

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**

ESCUELA POLITECNICA SUPERIOR

Departamento de Ingeniería Mecánica



**Grado en Ingeniería Mecánica**

Trabajo Fin de Grado

SIMULACIÓN DE UN ENSAYO DE VUELCO DE UN  
AUTOBÚS MEDIANTE LS-DYNA

**Autor:** Guillermo Núñez Milán

**Tutor:** Andrés Gómez Morón



# Agradecimientos

Después de seis años desde que empezó mi andadura en la universidad, puedo decir que se cierra un ciclo de mi vida. Me gustaría ocupar el primer espacio de mi último trabajo para mostrar mi agradecimiento a todos aquellos que estuvieron a mi lado:

A mi madre por sufrirme todos los días y haberme ayudado siempre que lo he necesitado, a mi abuelo por ser uno de mis mayores apoyos desde que tengo uso de razón, a mi padre por haber creído en mí y a mi chica por el apoyo incondicional y los paseos de relajación en las épocas de examen.

Por supuesto a todos los compañeros que he tenido y con los que me llevo muy buenos recuerdos, a mi tutor Andrés Gómez y todos mis profesores, a Carlos Ortiz y Ameen Topa por sus consejos y ayuda, a todos mis profesores de Salesianos Atocha que siempre me apoyaron al querer continuar estudiando, a mis amigos de siempre que tantas horas de estudio y de desconexión hemos compartido y a Jenny y Ana por los cafés de cada día antes de las intensas jornadas de estudio.

Muchas gracias.

# Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se realiza el vuelco de la estructura de un autobús conforme a lo que dicta el Reglamento R66 vigente, empleando el software de ordenador LS-Dyna. Se profundizará en el conocimiento de dicha normativa, la cual regula la homologación de las estructuras de autobuses. Además, se busca demostrar el potencial de las herramientas de cálculo por elementos finitos que permiten simular condiciones, materiales o impactos sin la necesidad de construir dichos modelos, con el consiguiente ahorro económico que ello conlleva.

Además, para la introducción de los datos y parámetros, se emplea el programa LS-Prepost, que permite realizar esta tarea de forma intuitiva sin necesidad de hacer uso de programación en código. Por tanto, se consigue simplificar el preprocesado de la información. Gracias a este programa, se comprobará si la estructura de un modelo de autobús superaría las pruebas reglamentarias con éxito.

Palabras clave: autobús, LS-Dyna, ensayo de vuelco, Reglamento R66, CDG, tensión, deformación.

# Abstract

The main goal of this project is to study the rollover of a bus structure that complies with the R66 regulations through LS-Dyna simulation software. Another part of the project takes an in-depth look at the knowledge of these regulations which dictate the design of bus structures. Moreover it will prove the potential of FEM tools which can incorporate conditions, materials or impacts into its simulations, eliminating the need for building expensive models.

Furthermore, the LS-Prepost software is used to simplify data input, making this task very intuitive, as it doesn't require any code or programming, therefore making the whole data preprocessing much easier and time-efficient. The project focuses on finding out if the bus structure would pass the mandatory safety tests

Keywords: bus, LS-Dyna, rollover test, R66 Regulations, CoG, stress, strain.

# Índice de Contenidos

|  |    |
|--|----|
| Capítulo I: Introducción y objetivos .....   | 1  |
| 1.1    Introducción .....  | 1  |
| 1.2    Objetivos del proyecto .....  | 4  |
| 1.3    Estructura del trabajo .....  | 5  |
| Capítulo II: Estado del arte.....  | 6  |
| 2.1    Historia del autobús .....  | 6  |
| 2.2    Clasificación de los tipos de accidentes .....  | 10 |
| 2.3    Reglamento R66 .....  | 11 |
| 2.3.1 Definiciones del reglamento .....  | 12 |
| 2.3.2 Requisitos y especificaciones.....   | 15 |
| 2.3.3 Determinación del centro de gravedad (CDG) .....   | 16 |
| 2.3.4 Tipología de ensayos de vuelco .....   | 19 |
| 2.3.4.1 Ensayo de vuelco como método básico de homologación .....  | 19 |
| 2.3.4.2 Ensayo de vuelco utilizando secciones de la carrocería como método de homologación equivalente .....               | 20 |
| 2.3.4.3 Ensayo de carga cuasiestática de secciones de la carrocería como método de homologación equivalente.....           | 20 |
| 2.3.4.4 Cálculo cuasiestático basado en el ensayo de componentes como método de homologación equivalente.....              | 21 |
| 2.3.4.5 Simulación por ordenador del ensayo de vuelco de un vehículo completo como método de homologación equivalente..... | 22 |
| 2.3.5 Condiciones del ensayo .....   | 22 |
| 2.4 Estudio del vuelco.....  | 24 |
| Capítulo III: Programa y procedimiento.....  | 29 |
| 3.1    Elementos finitos.....  | 29 |
| 3.2    Resolución de problemas.....  | 29 |
| 3.3    Ansys .....   | 30 |
| 3.4    Ls-Dyna y LS-Prepost .....  | 31 |
| 3.5    Modelo de autobús.....  | 32 |
| 3.5.1    Centro de gravedad .....  | 34 |
| 3.5.2    Cálculo del ángulo de vuelco .....  | 36 |
| 3.5.3    Estructura a estudiar .....   | 38 |
| 3.6    Modelado de la plataforma de vuelco .....   | 40 |



|  |  |    |
|--|--|----|
| 3.7  | Modelado del espacio de supervivencia .....              | 43 |
| 3.8  | Diagrama de bloques de procedimiento.....                | 47 |
| Capítulo IV: Simulación de vuelco de un autobús mediante LS-DYNA ..... |  | 49 |
| 4.1  | Configuración de LS-Prepost para el ensayo.....          | 49 |
| 4.1.1  | Configuración de unidades.....                           | 50 |
| 4.1.2  | Importación de la plataforma .....                       | 51 |
| 4.1.3  | Importación del espacio de seguridad .....               | 56 |
| 4.1.4  | Condiciones finales del ensayo .....                     | 59 |
| 4.1.5  | Configuración de los datos de salida .....               | 65 |
| 4.2  | Simulación .....   | 66 |
| 4.3  | Reducción del modelo .....                               | 68 |
| 4.4  | Diagrama de bloques de procedimiento.....                | 70 |
| Capítulo V: Resultados .....   |  | 71 |
| 5.1  | Análisis del espacio de seguridad.....                   | 71 |
| 5.2  | Análisis de la energía.....                              | 74 |
| 5.3  | Análisis de la velocidad y aceleración .....             | 75 |
| 5.4  | Análisis de nodos representativos de la estructura ..... | 77 |
| 5.4.1  | Análisis de desplazamientos .....                        | 78 |
| 5.4.2  | Análisis de la velocidad .....                           | 80 |
| 5.5  | Análisis de nodos representativos de la estructura ..... | 81 |
| 5.5.1  | Análisis de tensiones y deformaciones.....               | 82 |
| 5.5.2  | Análisis de esfuerzos.....                               | 87 |
| Capítulo VI: Conclusiones y desarrollos futuros .....                  |  | 88 |
| 6.1  | Conclusiones .....                                       | 88 |
| 6.2  | Desarrollos futuros.....                                 | 90 |
| Capítulo VII: Referencias .....  |  | 92 |

## Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Relación de fallecidos en accidentes de autobús en España desde 1993 hasta 2012 [1] ..... | 2  |
| Figura 2: Estadísticas de accidentes de autobús y autocar con fallecidos en 2013 [2] ..             | 3  |
| Figura 3: Ocupantes fallecidos por cada mil millones de kilómetros – persona 2013 [2]               | 4  |
| Figura 4: Primeros autobuses de tracción animal .....   | 6  |
| Figura 5: Landauer de 1895 [3] .....  | 6  |
| Figura 6: Primeros autobuses Daimler de 2 plantas [3] .....   | 7  |
| Figura 7: autobús aerodinámico Daimler-Benz [3] .....   | 8  |
| Figura 8: Daimler-Benz O 4500 de 1948 [3] .....   | 8  |
| Figura 9: Mercedes-Benz O 321 H [3] .....   | 9  |
| Figura 10: Mercedes-Benz O 305 [3] .....  | 9  |
| Figura 11: Representaciones de los tipos de colisiones [4] .....                                    | 11 |
| Figura 12: Determinación del espacio de seguridad en el plano transversal [6] .....                 | 15 |
| Figura 13: Determinación del espacio de seguridad en el plano longitudinal [6] .....                | 15 |
| Figura 14: Ensayo de vuelco [6] .....   | 16 |
| Figura 15: Posición longitudinal del centro de gravedad .....                                       | 17 |
| Figura 16: Posición transversal del centro de gravedad [6] .....                                    | 17 |
| Figura 17: Cálculo de la altura del CDG [8] .....   | 18 |
| Figura 18: Ensayo de vuelco de un autobús [8] .....   | 19 |
| Figura 19: Ensayo de aplicación de carga [6] .....  | 20 |
| Figura 20: Localización de las bisagras plásticas de un segmento [6] .....                          | 21 |
| Figura 21: Características de los soportes de las ruedas y plataforma de basculamiento [6] .....    | 23 |
| Figura 22: Dimensiones del maniquí [6] .....  | 24 |
| Figura 23: Puntos clave en el estudio del vuelco .....  | 25 |
| Figura 24: Estudio de fuerzas en un autobús .....   | 25 |
| Figura 25: Autobús en plataforma de vuelco .....  | 27 |
| Figura 26: Autobús en punto inestable .....   | 27 |
| Figura 27: Autobús durante el proceso de vuelco .....   | 28 |
| Figura 28: Logo de Ansys .....  | 31 |
| Figura 29: Impacto de un vehículo contra un muro simulado mediante LS-Dyna .....                    | 32 |
| Figura 30: Vista frontal del autobús .....  | 33 |
| Figura 31: Vista en planta del autobús .....  | 33 |
| Figura 32: Vista de perfil del autobús .....  | 33 |
| Figura 33: Posición del origen de coordenadas desde la planta inferior .....                        | 34 |
| Figura 34: Menú para obtener medidas en LS-Prepost .....  | 35 |
| Figura 35: Posición del centro de gravedad .....  | 36 |
| Figura 36: Cotas de plataforma y CDG .....  | 37 |
| Figura 37: Punto inestable .....  | 37 |
| Figura 38: Estructura del autobús .....   | 38 |
| Figura 39: Vista de perfil de la estructura .....   | 38 |
| Figura 40: Vista isométrica de la plataforma .....  | 41 |
| Figura 41: vista de la inclinación del plano de vuelco y los soportes .....                         | 41 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 42: Vista en detalle de un soporte.....   | 42 |
| Figura 43: Cotas de la plataforma.....   | 42 |
| Figura 44: Detalle de los soportes para las ruedas .....                               | 42 |
| Figura 45: Imágenes 2a y 2c del R66 .....  | 44 |
| Figura 46: Imagen 2b del R66.....  | 45 |
| Figura 47: Asientos, suelo y ventanas del autobús .....                                | 45 |
| Figura 48: Medición entre el último asiento y el parabrisas trasero .....              | 46 |
| Figura 49: Resultados de la medición entre el último asiento y el parabrisas trasero.. | 46 |
| Figura 50: Vistas 2D del espacio de seguridad .....                                    | 47 |
| Figura 51: Modelo 3D del espacio de seguridad .....                                    | 47 |
| Figura 52: Pasos a seguir en la fase de diseño.....                                    | 48 |
| Figura 53: Cuadro de diálogo <i>Old to New</i> .....                                   | 49 |
| Figura 54: Selección de unidades en LS-Prepost.....                                    | 50 |
| Figura 55: Selección de características de mallado .....                               | 51 |
| Figura 56: Selección de material.....  | 52 |
| Figura 57: Propiedades asignadas a la plataforma .....                                 | 52 |
| Figura 58: Parámetros de sección .....   | 53 |
| Figura 59: Asignación de propiedades de pieza.....                                     | 54 |
| Figura 60: Restricción de movimientos .....  | 55 |
| Figura 61: Set de pieza.....   | 55 |
| Figura 62: Visualización del espacio de seguridad en LS-Prepost .....                  | 56 |
| Figura 63: Creación de material nulo .....   | 57 |
| Figura 64: Creación de sección para el espacio de seguridad .....                      | 57 |
| Figura 65: Creación de la pieza espacio de seguridad.....                              | 58 |
| Figura 66: Autobús con espacio de seguridad .....                                      | 59 |
| Figura 67: Autobús importado.....  | 59 |
| Figura 68: Menú de rotación y traslación .....   | 60 |
| Figura 69: Autobús en posición inestable.....  | 61 |
| Figura 70: Set de autobús y plataforma .....   | 61 |
| Figura 71: Menú de definición de curva .....   | 62 |
| Figura 72: Introducción parámetros de carga.....                                       | 63 |
| Figura 73: Parámetros de contacto .....  | 64 |
| Figura 74: Autobús con el mallado aplicado.....  | 64 |
| Figura 75: Pantalla de duración de la simulación .....                                 | 65 |
| Figura 76: Configuración de datos de salida .....                                      | 66 |
| Figura 77: Configuración de datos de salida .....                                      | 66 |
| Figura 78: Lanzador de LS-Dyna .....   | 67 |
| Figura 79: Tiempo estimado de simulación.....  | 67 |
| Figura 80: Estructura resultante para la simulación .....                              | 68 |
| Figura 81: Modelo en posición inicial .....  | 69 |
| Figura 82: Tiempo total de simulación tras las modificaciones.....                     | 70 |
| Figura 83: Diagrama de bloques para la configuración de LS-Prepost.....                | 70 |
| Figura 84: Posición inicial del vuelco ( $t=0$ ) .....                                 | 72 |
| Figura 85: Posición intermedia del proceso de vuelco ( $t=2.3$ ) .....                 | 72 |
| Figura 86: Posición de la estructura en el momento del impacto ( $t=2.6$ ) .....       | 73 |
| Figura 87: Posición final de la estructura tras el ensayo ( $t=4.3$ ) .....            | 73 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 88: Variación de energía cinética .....  | 74 |
| Figura 89: Variación de la velocidad de caída de la estructura .....                                  | 75 |
| Figura 90: Variación de la aceleración en la caída de la estructura.....                              | 76 |
| Figura 91: Desplazamiento de la estructura en el eje Z .....  | 76 |
| Figura 92: Nodos a estudiar de la parte superior de la estructura .....                               | 77 |
| Figura 93: Nodos a estudiar en la parte inferior de la estructura .....                               | 78 |
| Figura 94: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje X .....                                | 79 |
| Figura 95: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje Y .....                                | 80 |
| Figura 96: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje Z .....                                | 80 |
| Figura 97: Variación de la velocidad lineal en el eje Z de los nodos seleccionados ....               | 81 |
| Figura 98: Elementos seleccionados para estudiar.....   | 82 |
| Figura 99: Tensión en el eje X en los elementos seleccionados .....                                   | 83 |
| Figura 100: Tensión en el eje Y en los elementos seleccionados .....                                  | 83 |
| Figura 101: Tensión en el eje Z en los elementos seleccionados .....                                  | 84 |
| Figura 102: Deformación plástica equivalente de la estructura en los elementos<br>seleccionados ..... | 85 |
| Figura 103: Tensión equivalente de Von Mises en los elementos seleccionados.....                      | 86 |
| Figura 104: Tensión de Tresca en los elementos seleccionados .....                                    | 86 |
| Figura 105: Esfuerzos axiales en dirección del eje X .....  | 87 |
| Figura 106: Esfuerzos axiales en dirección del eje Y .....  | 87 |



## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1: Valores más destacados de fallecidos en accidentes de autobús desde 1993 hasta 2012..... | 2  |
| Tabla 2: Valores más destacados de heridos en accidentes de autobús desde 1993 hasta 2012.....    | 3  |
| Tabla 3: Lista de materiales de la estructura.....  | 39 |
| Tabla 4: Lista de secciones de la estructura .....  | 40 |
| Tabla 5: Unidades a utilizar en LS-Prepost.....   | 51 |
| Tabla 6: Propiedades de material rígido.....  | 53 |



# Capítulo I: Introducción y objetivos

## 1.1 Introducción

De todos es sabido que el autobús es un vehículo terrestre empleado para el transporte de personas. Debido a su gran capacidad, se trata de un medio de transporte muy crítico, ya que cuando se producen accidentes graves la cifra de heridos y fallecidos suele ser elevada.

Generalmente se dice que un autobús hace referencia al transporte urbano, mientras que el término autocar u omnibús se emplea para el interurbano. La palabra omnibús proviene del latín y se divide en “omnis”, que significa “todo”, y en “bus” que corresponde con el dativo plural. Por ello y haciendo referencia al transporte público, omnibús quiere decir “el transporte para todos”.

Debido a la elevada capacidad de transporte de estos vehículos, se están realizando exhaustivos estudios para mejorar tanto la comodidad de los pasajeros como su seguridad. Esto se puede comprobar observando la Figura 1 que muestra el número total de fallecidos en accidentes de autobús en España desde 1993 hasta 2012.

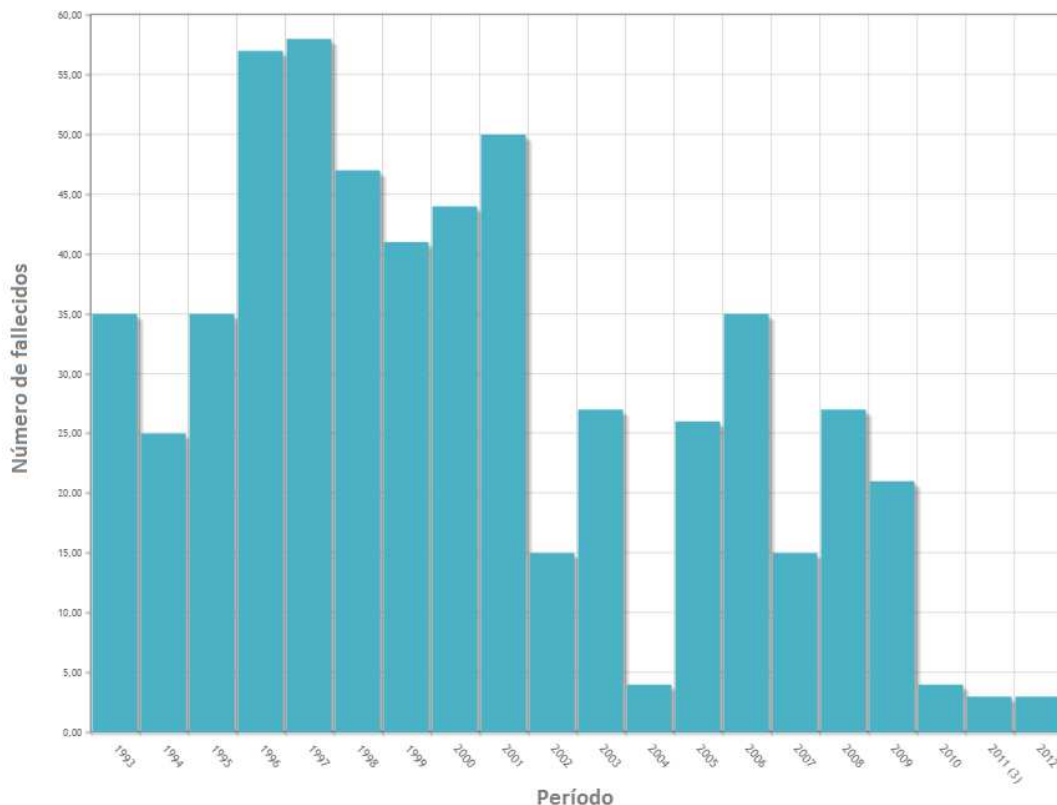


Figura 1: Relación de fallecidos en accidentes de autobús en España desde 1993 hasta 2012 [1]

Como se aprecia a grandes rasgos, la tendencia se dirige hacia un descenso en el número de fallecidos en estos accidentes. En la tabla 1 se muestran los valores más destacables de la Figura 1.

Tabla 1: Valores más destacados de fallecidos en accidentes de autobús desde 1993 hasta 2012

| Año                  | 1993 | 1996 | 1998 | 2001 | 2003 | 2006 | 2008 | 2010 | 2012 |
|----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Número de fallecidos | 35   | 57   | 47   | 50   | 27   | 35   | 27   | 4    | 3    |

Atendiendo al número de heridos, agrupando leves y graves, también se aprecia un claro descenso. Como se puede ver en la tabla 2, en los primeros años estudiados el número de heridos es potencialmente bajo, esto se atribuye a que hace

23 años el número de autobuses era más reducido que en la actualidad, hecho que repercute claramente en la cifra tanto de heridos como de fallecidos. Por ello, se puede concluir que los datos registrados en la actualidad son prometedores, sobre todo atendiendo al número de fallecidos.

Tabla 2: Valores más destacados de heridos en accidentes de autobús desde 1993 hasta 2012

| Año               | 1993 | 1996 | 1998 | 2001 | 2003 | 2006 | 2008 | 2010 | 2012 |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Número de heridos | 1350 | 1386 | 1809 | 1947 | 2276 | 2653 | 1975 | 1671 | 1380 |

Si se atiende a los tipos de accidentes, se pueden consultar los siguientes datos extraídos en el año 2013 (Figura 2), que reflejan que en torno al 32% de los accidentes de autobús y autocar con fallecidos son producidos por un vuelco. El 50% son ocasionados por colisiones frontales.

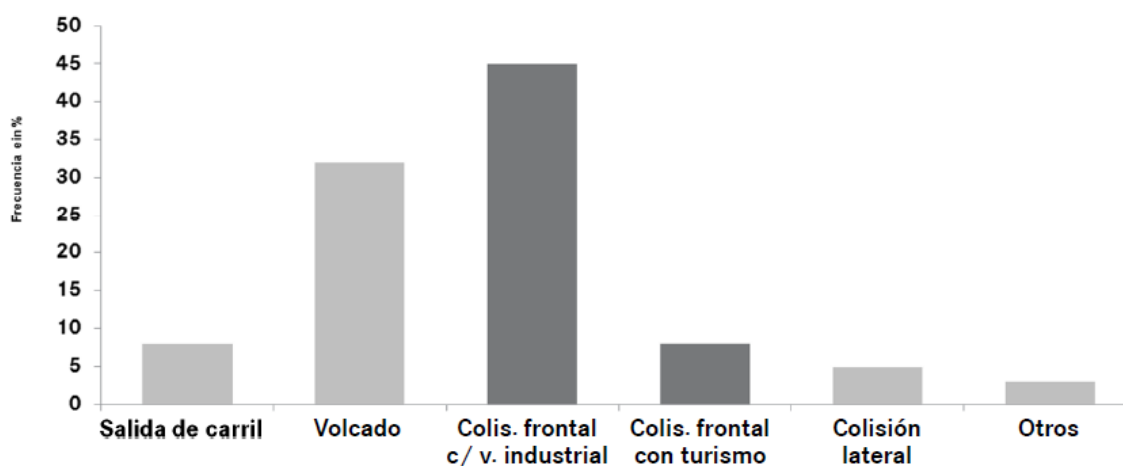


Figura 2: Estadísticas de accidentes de autobús y autocar con fallecidos en 2013 [2]

A pesar de que el vuelco no reúna el mayor porcentaje de accidentes con fallecidos, en los últimos años se están llevando a cabo diversos estudios y mejoras en materia de seguridad, como es la implantación del reglamento R66, que establece

diversas pautas que deben cumplir las superestructuras de autobuses para ser homologadas. Este incremento en la seguridad y el continuo desarrollo de sistemas de seguridad activa (ESP, control de presión de neumáticos, etc), así como de seguridad pasiva (Reglamento R66, cinturones en los asientos, etc) ha hecho que las cifras de fallecidos en relación distancia-persona sea la menor de todos los medios de transporte (Figura 3).

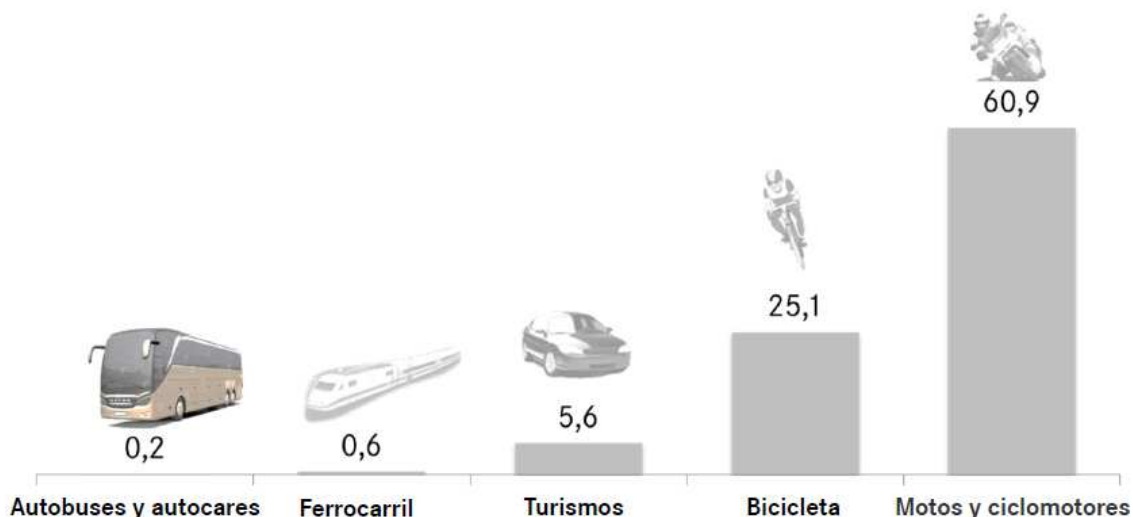


Figura 3: Ocupantes fallecidos por cada mil millones de kilómetros – persona 2013 [2]

## 1.2 Objetivos del proyecto

Los principales objetivos que se pretenden conseguir con el presente Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Conocer el Reglamento R66 que regula los ensayos para la homologación de estructuras de autobuses.
- Realizar el ensayo de vuelco de un modelo de autobús conforme al Reglamento R66 mediante LS-Dyna y utilizando LS-Prespost como pre-postprocesador.
- Realizar un estudio de las tensiones, deformaciones y otros parámetros de interés en la estructura de un autobús tras haber realizado un ensayo de vuelco.
- Comprobar si la estructura empleada superaría favorablemente el ensayo de vuelco según el Reglamento R66, así como verificar que se



respetar el espacio de supervivencia dentro de la estructura tras producirse el impacto.

## 1.3 Estructura del trabajo

Este Trabajo Fin de Grado consta de siete capítulos, siendo el primero de ellos la presente INTRODUCCIÓN. A continuación, se hace una breve descripción del contenido de los capítulos sucesivos:

- En el CAPÍTULO 2, ESTADO DEL ARTE, se realiza una revisión de la historia del autobús, así como de los requisitos esenciales que establece el Reglamento R66.
- En el CAPÍTULO 3, PROGRAMA Y PROCEDIMIENTO, se explican los programas que se van a emplear y se diseñan las piezas necesarias.
- En el CAPÍTULO 4, SIMULACIÓN DE VUELCO DE UN AUTOBÚS MEDIANTE LS-DYNA, se muestra la metodología a seguir para introducir los parámetros y valores que permitirán la obtención de unos resultados correctos y coherentes.
- En el CAPÍTULO 5, RESULTADOS, se presentan los resultados obtenidos.
- En el CAPÍTULO 6, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS, se extraen las conclusiones pertinentes analizando los resultados y se exponen una serie de trabajos futuros que continúen con la línea de trabajo iniciada a través de este Trabajo Fin de Grado.
- En el CAPÍTULO 7, REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS se detallan las referencias consultadas durante todo el trabajo.

## Capítulo II: Estado del arte

### 2.1 Historia del autobús

Los primeros autobuses que existieron, fueron carruajes tirados por caballos que eran capaces de desplazar elevados números de personas (Figura 4).



Figura 4: Primeros autobuses de tracción animal

El primer autobús de tracción no animal que existió fue lanzado en 1831 en Inglaterra. Estaba dotado de un motor de vapor y podía transportar hasta diez pasajeros. En 1895, Karl Benz fabrica el primer autobús con motor de combustión, bautizado como el Landauer (Figura 5), por analogía con un carruaje de la época. Estaba dotado de un motor monocilíndrico de 4 tiempos con 5 CV de potencia, que accionaba las ruedas traseras y que podía alcanzar los 15 km/h. Podía transportar como máximo 8 pasajeros.



Figura 5: Landauer de 1895 [3]

En 1905 se abre en Alemania la primera línea de autobuses propulsados por combustión, coincidiendo además con el comienzo de la utilización de los mismos por

correos. Se trataba de autobuses Daimler con motores de cuatro cilindros y 28 CV. Ya se comienzan a desarrollar los diseños y se sustituyen las ruedas de madera o hierro por ruedas macizas de goma para mejorar el confort. Se fabrican también autobuses de dos pisos con hasta 39 asientos y que eran capaces de alcanzar los 22 km/h, como se observa en la Figura 6.



Figura 6: Primeros autobuses Daimler de 2 plantas [3]

En el año 1911 surge Scania-Vabis de la fusión de ambas empresas y comienzan a producir su propio autobús para tratar de responder a la competencia de Daimler-Benz.

En torno a 1918, la empresa alemana MAN, comienza a fabricar autobuses además de camiones, generando grandes avances y destinándolos tanto para pasajeros como para correos.

En 1924 MAN comienza a producir los primeros autobuses de bastidor bajo. En 1934 Daimler-Benz fabrica un nuevo concepto de autobús. Se mejora la aerodinámica y la velocidad (Figura 7). El vehículo de tamaño mediano contaba con un motor diesel de 95 CV que podía viajar a 115 km/h, además de introducirse calefacción y ventilación. El asiento del conductor se encuentra delante junto al motor, estructura denominada Pullman.



Figura 7: autobús aerodinámico Daimler-Benz [3]

En el año 1943, surge GM Truck and Coach Division, que se dedicaría a fabricar autocares y autobuses para Canadá y Estados Unidos. Debido a la gran competencia, la empresa cesaría su actividad en el año 1980.

A partir de 1948 se introduce el concepto de capot tal como se conoce en la actualidad y se pondría mayor hincapié en elaborar diseños más atractivos (Figura 8). La producción de estos modelos sería lenta debido a la devastación tras la guerra.



Figura 8: Daimler-Benz O 4500 de 1948 [3]

En el año 1954 se presenta el Mercedes-Benz O 321 H (Figura 9), que revoluciona el mercado con una estructura semi- integral dotada de una carrocería que se sustenta sobre una plataforma portante. Con este avance y el cambio de las ballestas delanteras por resortes helicoidales, se logra mejorar la estabilidad, confort y una significativa reducción de peso. También se emplaza el motor en la parte trasera, consiguiendo reducir el ruido en el habitáculo.



Figura 9: Mercedes-Benz O 321 H [3]

A partir de aquí, comienza a desarrollarse rápidamente el sector de los autobuses, hecho que crea la necesidad de proponer ciertas medidas para su regularización. La Agrupación de Empresas de Transporte Público lanza una serie de propuestas que deberán cumplir estos vehículos y que a grandes rasgos, afectarían a la disposición del motor, número y tamaño de puertas, parabrisas, etc. En 1967, Mercedes-Benz lanza el modelo O 305 (Figura 10), de acuerdo con las propuestas antes mencionadas. Poseía un motor que llegó a desarrollar 240 CV, estaba altamente estandarizado, medía 11,3 metros de longitud y contaba con puertas de doble batiente delante y en el centro.



Figura 10: Mercedes-Benz O 305 [3]

Continuando con las innovaciones, en el año 1977, se presenta el primer autobús articulado, el Mercedes-Benz O 350 G, con una longitud de 17,3 metros y 170 pasajeros de capacidad.

Desde entonces no paran de sucederse los avances e innovaciones por parte de todas las marcas del mercado, ya sea innovando en diseño como en seguridad. Poco a poco se han ido instalando en estos vehículos las cajas de cambio

automáticas, sistemas de retención, ABS, controles de cambio de carril, sistemas de detección de sueño del conductor y un sinfín de ayudas con el único objetivo de proteger a los pasajeros.

La resistencia de la estructura se define en el código ECE R66, el cual establece las pautas a seguir para poder homologar la misma y asegurar que en ningún momento el espacio de supervivencia pueda verse invadido en caso de colisión.

Esto ha facilitado que en relación a los datos publicados en 2013 por la Federación Española Empresarial de Transporte de Viajeros, sea siete veces más seguro viajar al colegio en autobús, que en transporte privado. Sus estadísticas mantienen a autobuses y autocares como líderes en seguridad en el transporte por carretera.

## **2.2 Clasificación de los tipos de accidentes**

Aunque no existe una clasificación establecida como oficial o que prevalezca sobre las demás, en general, los accidentes se pueden dividir en varias categorías o tipos según diversos criterios para su diferenciación. A continuación, se detalla la clasificación más utilizada:

- Dependiendo de donde se producen:
  - Urbanos.
  - En travesías.
  - Interurbanos: en autopista, autovía, etc.
- Según las consecuencias:
  - Con daños materiales.
  - Con heridos.
  - Mortales.
- En función del número de vehículos implicados:
  - Simples.
  - Complejos.
- Según la forma en que se producen:

- Choques: cuando el choque se produce entre un vehículo en movimiento y otro parado.
- Colisiones: cuando los vehículos que han colisionado se encontraban en movimiento (Figura 11). Pueden ser:
  - Colisiones frontales.
  - Colisiones perpendiculares.
  - Colisiones oblicuas.
  - Colisiones reflejas.
  - Colisiones por alcances.
  - Raspados.
- Atropellos.
- Accidentes con características especiales:
  - Salidas de vía.
  - Vuelco de campana: el vehículo rota sobre el eje longitudinal.
  - Vuelco de tonel: el vehículo rota sobre el eje longitudinal.


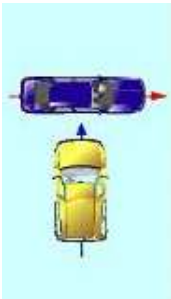
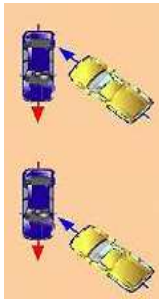
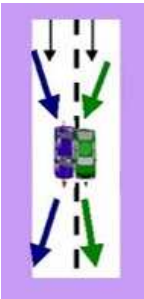


| Frontales   | Perpendiculares   | Oblicuas  | Reflejas  | Alcances  | Raspados  |
|---|---|---|---|---|---|
|  |  |  |  |  |  |

Figura 11: Representaciones de los tipos de colisiones [4]

## 2.3 Reglamento R66

Este reglamento va a afectar a los vehículos pertenecientes a las categorías M2 y M3. A grandes rasgos se puede decir que los vehículos de la categoría M son

aquellos destinados al transporte de pasajeros y su equipaje. Esta categoría se subdivide en otras tres [5]:

- M1: Tendrán como máximo 8 plazas para viajeros sin contar el conductor. No disponen de espacio para viajeros de pie.
- M2: Vehículos que cuentan con más de 8 plazas pero cuya masa máxima no supere las cinco toneladas. Además de plazas para viajeros sentados, pueden tener espacio para viajar de pie.
- M3: Esta categoría engloba los vehículos con más de 8 plazas y cuya masa máxima sea superior a las cinco toneladas. Podrá haber espacio para viajeros de pie.

### **2.3.1 Definiciones del reglamento**

A continuación se detallan las definiciones más relevantes que pueden encontrarse en el Reglamento R66 [6] y que serán de utilidad a lo largo del proyecto.

- Se entenderá por «vehículo» el autobús o autocar diseñado y equipado para el transporte de viajeros. El vehículo es una representación individual de un tipo de vehículo.

- Se entenderá por «tipo de vehículo» la categoría de vehículos fabricados con la misma especificación técnica de diseño, las mismas dimensiones principales y la misma disposición de construcción. El tipo de vehículo vendrá definido por el fabricante del vehículo.

- Se entenderá por «grupo de tipos de vehículo» los tipos de vehículo, actuales y futuros, que estén incluidos en la homologación del peor caso, en relación con el Reglamento R66.

- Se entenderá por «vehículo de dos pisos» el vehículo en el que los espacios destinados a viajeros estén situados, al menos en una parte, en dos niveles superpuestos y en cuyo piso superior no haya espacios para viajar de pie.



- Se entenderá por «el peor caso» el tipo de vehículo, dentro de un grupo de tipos de vehículo, que tenga menos probabilidades de cumplir los requisitos del presente Reglamento por lo que respecta a la resistencia de su superestructura. Los tres parámetros que definen el peor caso son: la resistencia estructural, la energía de referencia y el espacio de supervivencia.

- Se entenderá por «homologación de un tipo de vehículo» el proceso oficial completo mediante el cual el tipo de vehículo se somete a control y a ensayo para demostrar que cumple todos los requisitos especificados en el presente Reglamento.

- Se entenderá por «extensión de la homologación» el proceso oficial mediante el cual un tipo de vehículo modificado se homologa sobre la base de un tipo de vehículo previamente homologado, comparando los criterios de estructura, energía potencial y espacio residual.

- Se entenderá por «vehículo articulado» el formado por dos o más secciones rígidas, articuladas entre sí, en el cual los compartimentos de viajeros de cada sección se intercomunicuen, de manera que los viajeros puedan desplazarse libremente por ellos; las secciones rígidas han de estar permanentemente conectadas y solo podrán separarse mediante una operación en la que se utilicen herramientas que normalmente solo se encuentren en un taller.

- Se entenderá por «compartimento o compartimentos de viajeros» el espacio o espacios destinados a ser utilizados por los viajeros, salvo los ocupados por instalaciones fijas, como bares, cocinas o aseos.

- Se entenderá por «dispositivo de retención» el dispositivo que, en caso de vuelco, mantenga unidos a su asiento a los viajeros, el conductor o los miembros del personal.

- Se entenderá por «plano central longitudinal vertical» (VLCP), el plano vertical que atraviesa los puntos medios de la trayectoria del eje delantero y del eje trasero.

- Se entenderá por «espacio de supervivencia» el espacio que ha de quedar en el compartimento o compartimentos del conductor, de viajeros y del personal para que

el conductor, los viajeros y el personal tengan más posibilidades de sobrevivir en caso de vuelco.

- Se entenderá por «masa en orden de marcha» ( $M_k$ ) la masa del vehículo, sin ocupantes ni carga, pero con 75 kg de masa del conductor, la masa del combustible correspondiente al 90 % de la capacidad del depósito especificada por el fabricante y, en su caso, la masa del refrigerante, el lubricante, las herramientas y la rueda de repuesto.

- Se entenderá por «masa total de los ocupantes» ( $M_m$ ) la masa combinada de los viajeros y el personal que ocupe asientos equipados con dispositivos de retención.

- Se entenderá por «masa total efectiva del vehículo» ( $M_t$ ) la masa en orden de marcha del vehículo ( $M_k$ ) combinada con la proporción ( $k = 0,5$ ) de la masa total de los ocupantes ( $M_m$ ) que se considere que está firmemente sujeta al vehículo.

- Se entenderá por «masa de cada ocupante» ( $M_{mi}$ ) la masa de un solo ocupante, cuyo valor es de 68 kg.

- Se entenderá por «energía de referencia» ( $E_R$ ) la energía potencial del tipo de vehículo que se va a homologar, medida en relación con el nivel inferior horizontal de la cuneta en la posición inicial, inestable, del proceso de vuelco.

- Se entenderá por «ensayo de vuelco de un vehículo completo» el ensayo realizado con un vehículo completo, a escala real, para probar la resistencia exigida de la superestructura.

- Se entenderá por «banco de ensayo» el dispositivo técnico, compuesto por la plataforma de basculamiento, la cuneta y una superficie de cemento, utilizado en el ensayo de vuelco de un vehículo completo o de secciones de la carrocería.

- Se entenderá por «plataforma de basculamiento» el plano rígido que puede rotar alrededor de un eje horizontal para hacer bascular a un vehículo completo o una sección de la carrocería.

### 2.3.2 Requisitos y especificaciones

El requisito principal es que la superestructura no invada o dañe el espacio de supervivencia durante el vuelco o una vez finalizado el mismo. El espacio de supervivencia se delimita como puede verse en la Figura 12, desplazando el plano en dirección longitudinal (Figura 13).

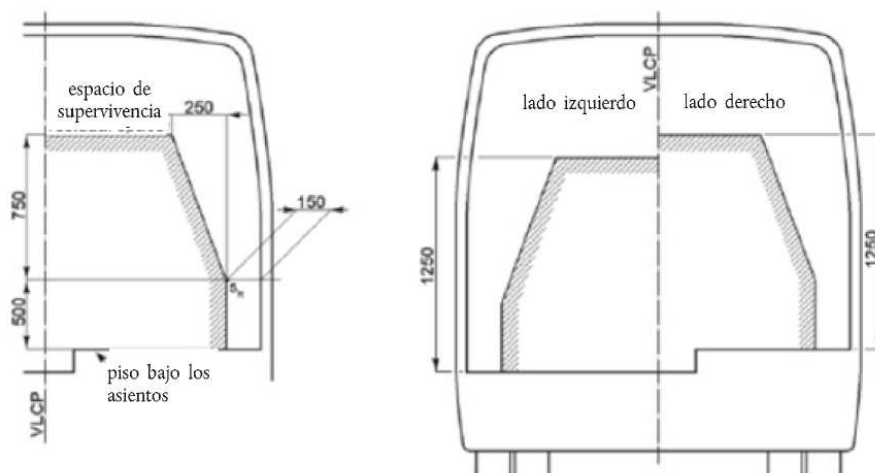


Figura 12: Determinación del espacio de seguridad en el plano transversal [6]

Como se observa, el punto  $S_R$  se encontrará sobre el respaldo del asiento exterior a 500 mm del suelo y a 150 mm de la pared lateral. En el plano longitudinal, el espacio de supervivencia estará comprendido desde 200mm por detrás del punto  $S_R$  del último asiento, hasta 600 mm por delante del primer asiento, ya sea del conductor o pasajeros. En caso de que los asientos de cabeza del vehículo estén a diferentes distancias, el espacio de supervivencia tendrá diferente longitud en función de la zona.

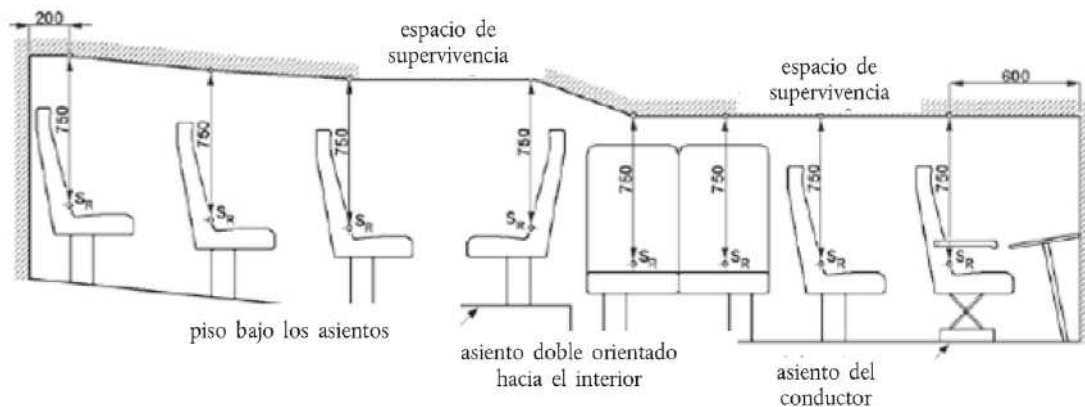


Figura 13: Determinación del espacio de seguridad en el plano longitudinal [6]

En cuanto a las especificaciones generales, cabe decir que se trata de un basculamiento lateral, el cual comienza con el vehículo en la posición de equilibrio inestable,  $CG'$  en la Figura 14, y con velocidad angular inicial nula.

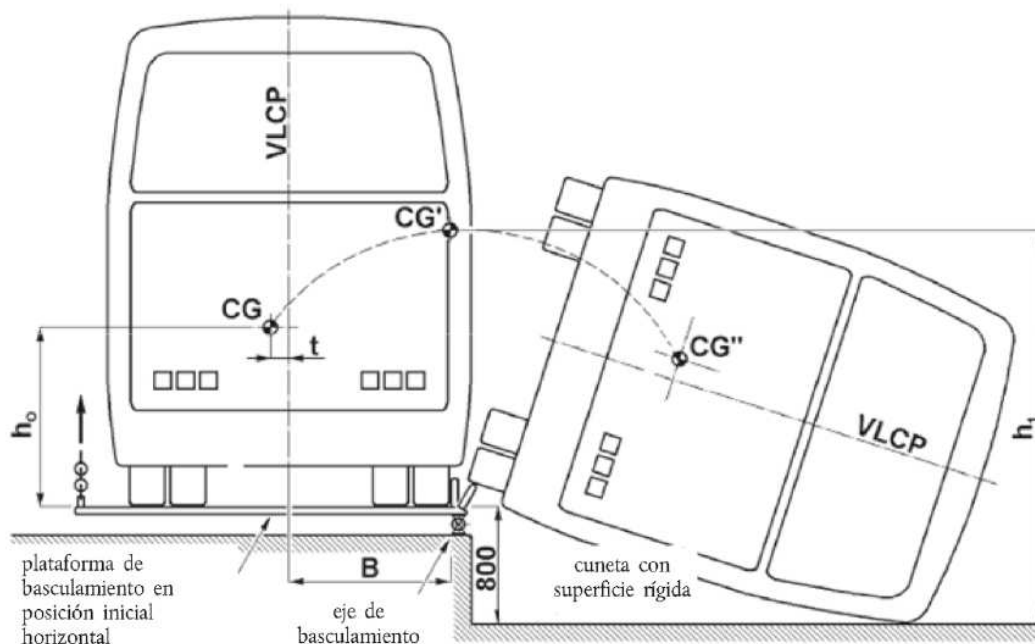


Figura 14: Ensayo de vuelco [6]

### 2.3.3 Determinación del centro de gravedad (CDG)

Para localizar el centro de gravedad es necesario obtener sus tres coordenadas. Según el reglamento R66 se deben referenciar de la siguiente manera:

- $l_1$  = Distancia longitudinal. Medida desde la línea central del eje frontal.
- $t$  = Distancia transversal. Medida desde el plano central longitudinal vertical.
- $h_0$  = Altura vertical. Medida desde el suelo estando los neumáticos inflados.

La búsqueda del centro de gravedad en la realidad, se divide en el plano horizontal y vertical. Para el plano horizontal basta con subir el vehículo sobre cuatro básculas (una por rueda) y se puede calcular fácilmente. Para el caso de la altura del CDG existen cuatro métodos: método de modificación de reacción, método de punto nulo, método de contrapeso y método del péndulo [7].

Viendo la Figura 15, extraída del Reglamento R66, se puede explicar la forma de obtener la posición longitudinal del CDG.

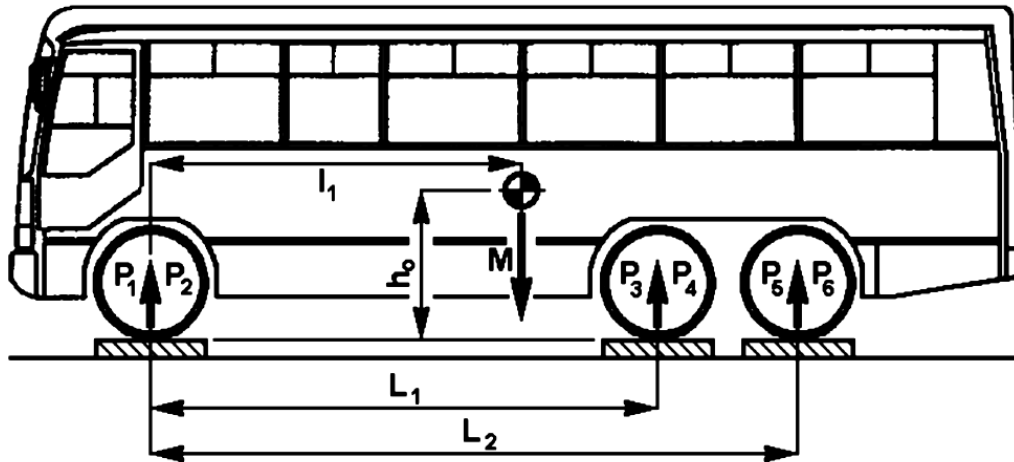


Figura 15: Posición longitudinal del centro de gravedad

Como se puede observar, las reacciones  $P_1$ ,  $P_3$  y  $P_4$  serán las reacciones de las ruedas del lado izquierdo de cada eje, mientras que las reacciones  $P_2$ ,  $P_4$  y  $P_6$  son las correspondientes a las ruedas del lado derecho de cada eje.  $L_1$  es la distancia del primer al segundo eje, mientras que  $L_2$  será del primer al tercer eje. Como es de suponer, el peso total del vehículo se podrá calcular como:

$$P_{total} = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 ; \quad \text{Ec. 1}$$

Sabiendo lo anterior, obtiene la expresión de  $I_1$ :

$$I_1 = \frac{(P_3 + P_4) \cdot L_1 + (P_5 + P_6) \cdot L_2}{P_{total}} ; \quad \text{Ec. 2}$$

Para el cálculo de la posición transversal se procede como muestra la Figura

16.

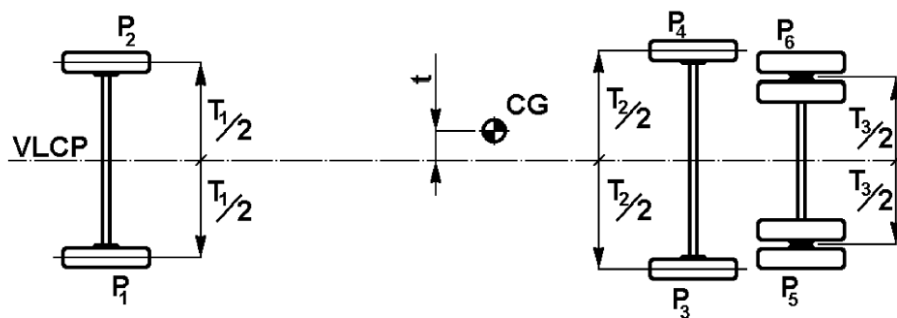


Figura 16: Posición transversal del centro de gravedad [6]

De esta Figura se deduce que T1 es el ancho de vía del primer eje, T2 es el ancho de vía del segundo eje y T3 es el ancho de vía del tercer eje o la distancia del centro de las ruedas a cada lado del eje. Para encontrar la posición del CDG se emplea la siguiente fórmula.

$$t = \left( (P_1 - P_2) \cdot \frac{T_1}{2} + (P_3 - P_4) \cdot \frac{T_2}{2} + (P_5 - P_6) \cdot \frac{T_3}{2} \right) \cdot \frac{1}{P_{total}} ; \quad \text{Ec. 3}$$

Para hallar la altura del centro de gravedad ( $h_0$ ), se coloca el eje delantero del autobús sobre dos células de carga horizontales. Las ruedas de uno de los ejes traseros sobre otras dos células de carga, que se encuentran en un plano horizontal situadas sobre unos soportes, de forma que el ángulo formado entre el suelo y el eje longitudinal del autobús sea mayor de  $20^\circ$ . Se puede observar en la Figura 17.

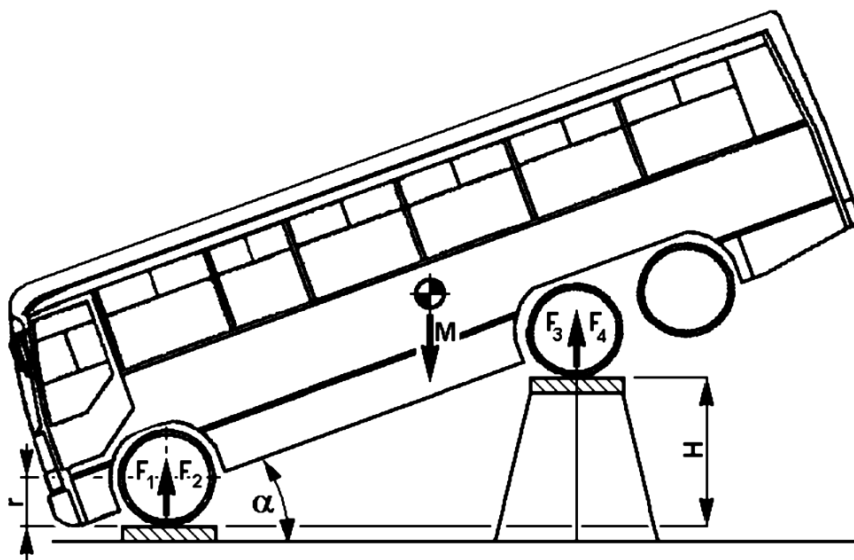


Figura 17: Cálculo de la altura del CDG [8]

El ángulo al que se someterá el vehículo durante el ensayo se calculará de la siguiente manera.

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{H}{L1}\right) ; \quad \text{Ec. 4}$$

Donde H es la diferencia de altura entre los ejes y L1 la distancia entre los mismos.

Como es de esperar, se deberá verificar que la suma de las 4 reacciones sobre las células de carga sea igual al peso total.

La posición vertical del CDG se calculará empleando la Ecuación 5.

$$h_0 = r + \left( \frac{1}{\tan \alpha} \right) \cdot \left( I_1 - L_1 \cdot \frac{F_3 + F_4}{P_{total}} \right); \quad \text{Ec. 5}$$

## 2.3.4 Tipología de ensayos de vuelco

Hay diferentes posibilidades en el ensayo de vuelco a la hora de homologar la estructura de un autobús. A continuación se detallan las principales características de los tipos de ensayo que recoge el Reglamento R66.

### 2.3.4.1 Ensayo de vuelco como método básico de homologación

El ensayo consiste en colocar el autobús entero sobre una superficie basculante y estudiar la intrusión de la estructura en el espacio de supervivencia al colisionar contra una superficie rígida. Dicha superficie será lisa y de cemento. En este caso, el vehículo tendrá las ruedas infladas, las puertas y ventanas estarán cerradas y tendrá su centro de gravedad en una posición similar al vehículo real (Figura 18).



Figura 18: Ensayo de vuelco de un autobús [8]

### 2.3.4.2 Ensayo de vuelco utilizando secciones de la carrocería como método de homologación equivalente

Este ensayo se trata de un caso similar al anterior, pero en lugar de utilizar el autobús entero en el ensayo, se emplean diversas secciones representativas del mismo, de forma que los resultados que se obtengan sean extrapolables al conjunto entero.

### 2.3.4.3 Ensayo de carga cuasiestática de secciones de la carrocería como método de homologación equivalente

Este ensayo se basa en la aplicación de carga de forma gradual sobre los travesaños superiores, hasta que la estructura invada el espacio de seguridad, tomando los datos de deformaciones que van correspondiendo a cada incremento de carga. En ese momento, se estudia la energía absorbida y la energía mínima que debería haber absorbido. La carga se aplicará sobre una placa rígida que la distribuya de forma uniforme. Este método es homólogo al antiguo de impacto con péndulo.

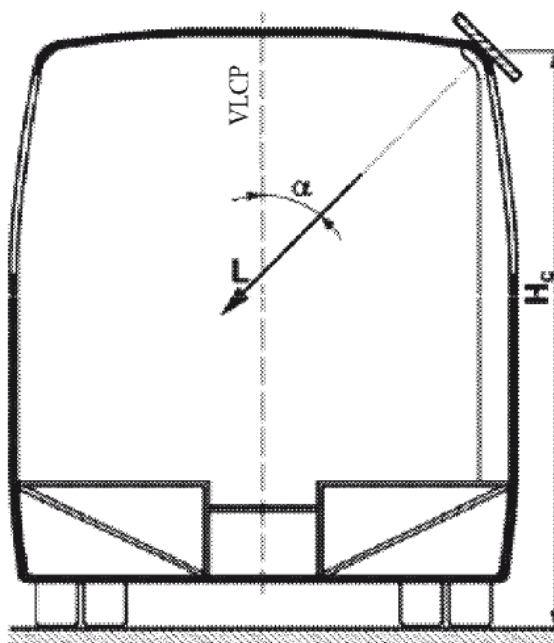


Figura 19: Ensayo de aplicación de carga [6]

La energía que ha de absorber se calcula de la siguiente forma.

$$E_T = 0.75 \cdot M \cdot g \cdot \Delta h; \quad \text{Ec. 6}$$



$M = M_k$ , la masa en orden de marcha del vehículo, si no está equipado con dispositivos de retención, o  $M_t$ , la masa total efectiva del vehículo, si está equipado con dispositivos de retención.

$\Delta h$  = El movimiento vertical del centro de gravedad del vehículo durante un ensayo de vuelco

#### 2.3.4.4 Cálculo cuasiestático basado en el ensayo de componentes como método de homologación equivalente

Este ensayo se basa en la creación de un modelo matemático que identifique y sitúe en la estructura las zonas plásticas y bisagras plásticas (Figura 20). Este modelo debe ser capaz de tener en cuenta la no linealidad entre carga y deformación de las bisagras plásticas.

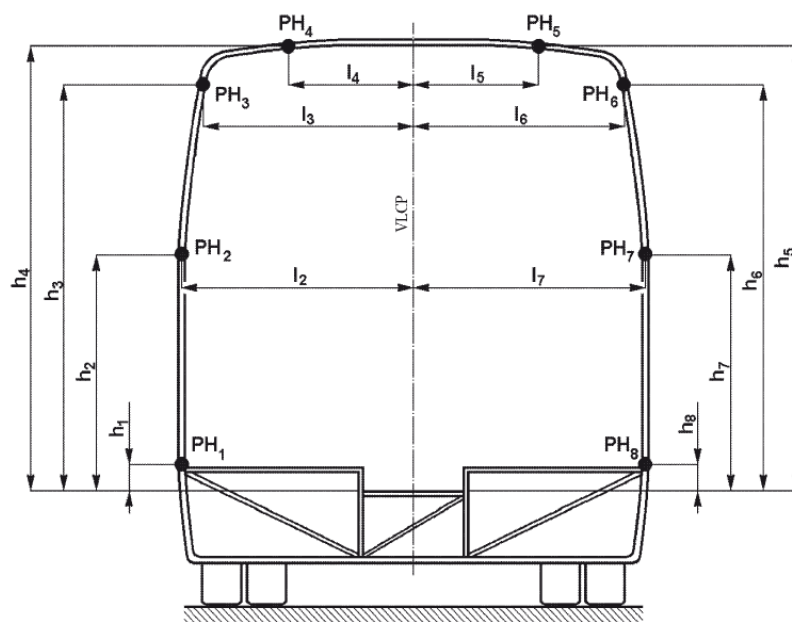


Figura 20: Localización de las bisagras plásticas de un segmento [6]

La carga se aplicará mediante pequeños incrementos, como en el caso anterior. A cada uno de estos incrementos se le asignará su correspondiente deformación. El ensayo finalizará cuando la estructura invada el espacio de supervivencia. En ese instante, la energía absorbida debe ser mayor que la energía mínima que es necesario que absorba, calculada empleando la ecuación 6 como en el apartado anterior.

### **2.3.4.5 Simulación por ordenador del ensayo de vuelco de un vehículo completo como método de homologación equivalente**

Esta simulación trata de crear las condiciones de un ensayo de vuelco real a través de un programa de ordenador. El modelo debe representar el vehículo manteniendo las características principales del mismo, centro de gravedad, momentos de inercia, etc. El servicio técnico requerirá los datos del software para dar el visto bueno y se reservará el derecho de ensayar parte de la estructura real para verificar que los supuestos son correctos.

### **2.3.5 Condiciones del ensayo**

A continuación se detallan las condiciones necesarias para que el ensayo de vuelco pueda ser aceptado como válido por el organismo competente.

La plataforma de basculamiento debe ser lo suficientemente rígida como para que ambos ejes se vayan elevando de forma simultánea, únicamente con un error menor de 1º entre ellos. La diferencia de altura entre la plataforma en la que se encuentra el autobús y la superficie contra la que se produce el impacto son  $800 \pm 20$  mm. Por otro lado, el eje de basculamiento se encontrará como máximo a 100 mm de la superficie de la plataforma y a otros 100 mm máximo de la pared vertical que separa la plataforma de la superficie de impacto. La superficie de impacto será de cemento, horizontal, lisa y seca. En cuanto a los soportes de las ruedas:

- Altura: no superará los dos tercios de la distancia entre la superficie sobre la que está situado el vehículo antes de bascular y la parte de la llanta de la rueda que se encuentre más cerca de la superficie.

- Anchura: 20 mm.
- Radio del borde: 10 mm.
- Longitud: 500 mm como mínimo.

En la Figura 21 se observan las medidas antes reflejadas.

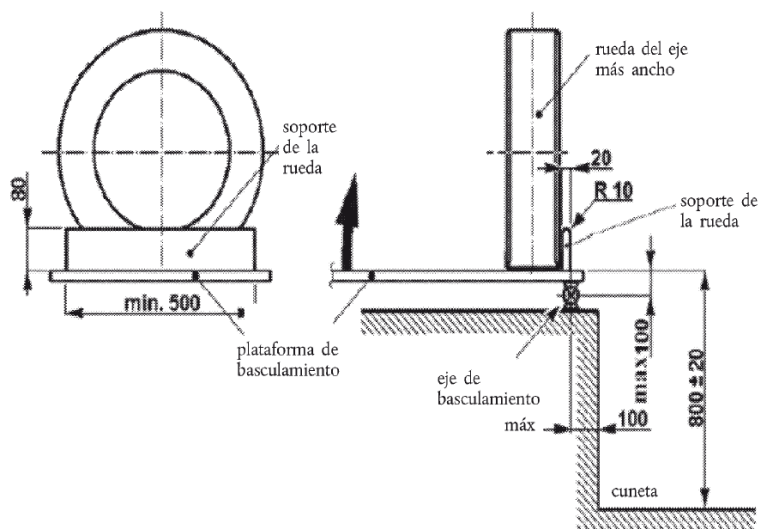


Figura 21: Características de los soportes de las ruedas y plataforma de basculamiento [6]

Deberá respetarse la posición del centro de gravedad real, así como la masa total del vehículo, que será masa en orden de marcha en caso de no tener dispositivos de retención o masa total efectiva cuando si los tenga. Será necesario que estén presentes todos los elementos que contribuyan a la resistencia de la superestructura, no así aquellos que sean valiosos como transmisión e instrumentos del salpicadero, pero no contribuyan a la resistencia. Si será necesario sustituirlos por masas equivalentes en valor y emplazamiento. Los líquidos corrosivos o explosivos podrán ser sustituidos por otros siempre que se respeten las condiciones de peso equivalente.

Si el autobús está equipado con sistemas de retención, a cada asiento se le deberá unir una masa adecuándose a una de estas dos opciones:

- Será del 50 % de la masa de cada ocupante ( $M_{mi}$ ) de 68 kg, estará colocada de manera que su centro de gravedad se encuentre 100 mm por encima y 100 mm por delante del punto R del asiento. Además estará sujeta de manera rígida y segura, de forma que no se rompa durante el ensayo.
- Será un maniquí, de 68 kg de masa, y estará sujeto con un cinturón de seguridad de dos puntos; el maniquí deberá permitir el movimiento y la colocación de los cinturones de seguridad. También estará colocado de manera que su centro de gravedad y sus dimensiones se ajusten a lo establecido en la Figura 22.

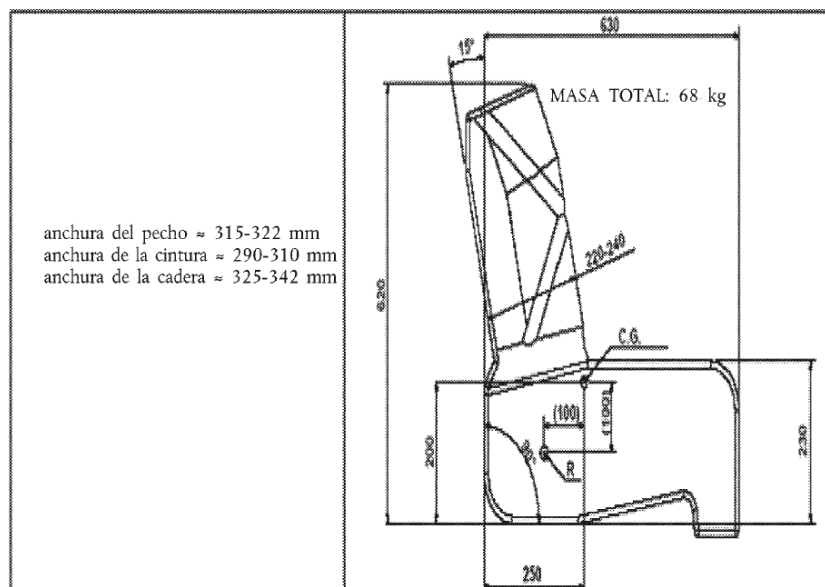


Figura 22: Dimensiones del maniquí [6]

En cuanto al vehículo, las ruedas han de estar infladas a la presión que indica el fabricante, todas las puertas y ventanas se encontrarán cerradas y además el movimiento de la suspensión y de los ejes estará bloqueado.

## 2.4 Estudio del vuelco

El vuelco de cualquier vehículo viene producido por la aparición de un momento en torno al centro de gravedad, que al llegar al punto de inestabilidad produce el basculamiento. Si por ejemplo, se estudia una curva hacia la derecha, las ruedas del lado izquierdo serán las que hagan de pivote durante el proceso de vuelco.

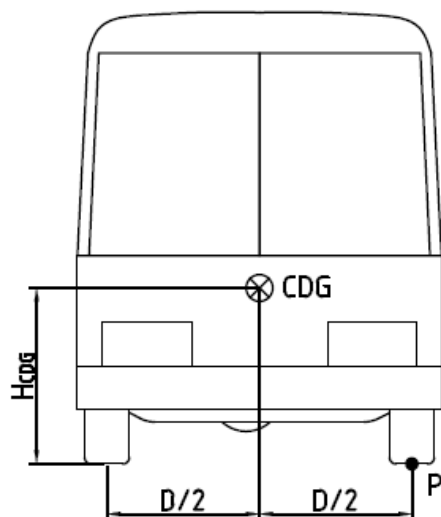


Figura 23: Puntos clave en el estudio del vuelco

En la Figura 23, se puede apreciar que el CDG se encuentra situado en el plano central transversal del autobús y a una altura  $H_{cdg}$ . El punto P, indica el pivotamiento en los neumáticos del lateral izquierdo al tomar una curva hacia la derecha.

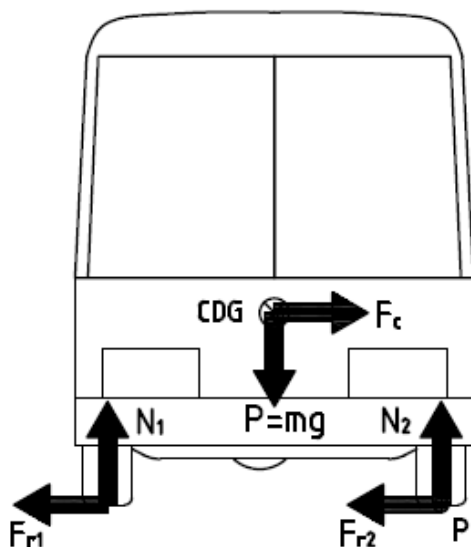


Figura 24: Estudio de fuerzas en un autobús

Como se puede observar (Figura 24), en las representaciones anteriores no se ha tenido en cuenta el efecto de la suspensión, ni el reparto diferente de pesos o fuerzas en las ruedas del mismo lateral.

Haciendo equilibrio en los ejes X e Y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\sum F_x = 0; \quad \text{Ec. 7}$$

$$F_{r1} + F_{r2} = F_c = \frac{mv^2}{R}; \quad \text{Ec. 8}$$

$$\sum F_y = 0; \quad \text{Ec. 9}$$

$$N_1 + N_2 = mg; \quad \text{Ec. 10}$$

Tomando momentos en el centro de gravedad:

$$\sum M_{CDG} = 0; \quad \text{Ec. 11}$$

$$N_1 \cdot \frac{D}{2} + F_{r1} \cdot H - N_2 \cdot \frac{D}{2} + F_{r2} \cdot H = 0; \quad \text{Ec. 12}$$

Como se puede comprobar, la reacción sobre las ruedas laterales exteriores debe compensar el momento creado por las otras tres componentes. Utilizando la ecuación 12 y despejando  $N_1$  en la ecuación 10, se llega a la siguiente conclusión.

$$N_2 = \frac{mg}{2} - \frac{mHv^2}{RD}; \quad \text{Ec. 13}$$

En el instante que la expresión anterior alcance un valor negativo, será cuando se inicie el vuelco en estas condiciones hipotéticas.

El ensayo de vuelco según dicta el reglamento R66, debe producirse en estado estático, es decir, la velocidad inicial del mismo debe ser nula, por lo que no existe el efecto de fuerzas de inercia. En este caso, el vuelco se iniciará cuando la posición del centro de gravedad, supere la del punto de pivotamiento y por tanto aparezca el momento de vuelco (Figuras 25 y 26).

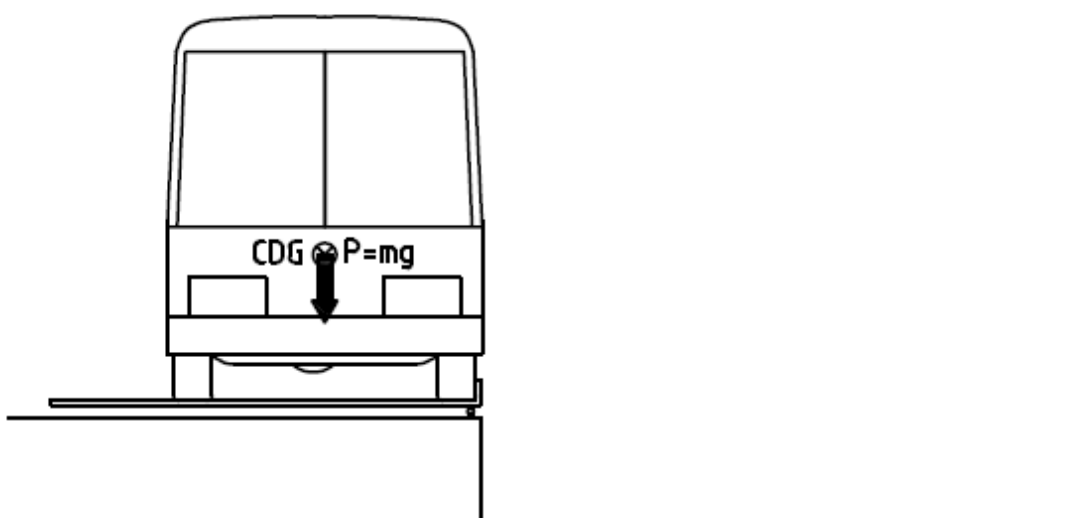


Figura 25: Autobús en plataforma de vuelco

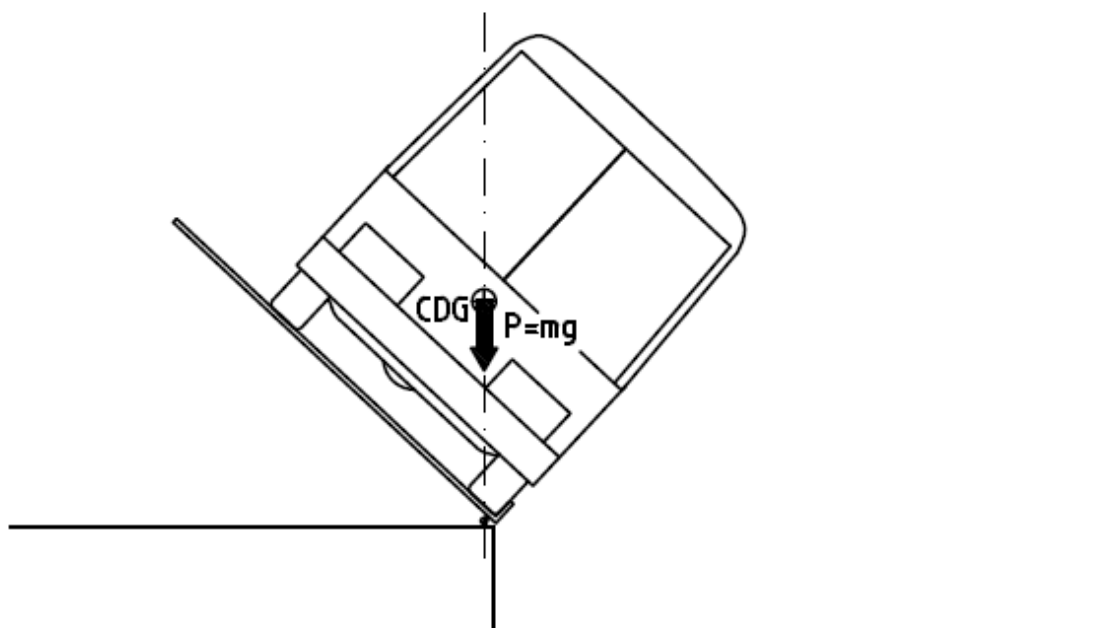


Figura 26: Autobús en punto inestable

A partir del punto de inestabilidad, se inicia el vuelco debido al momento creado por el peso del vehículo. Como se observa en la Figura 27, la resultante del peso colocada en el centro de gravedad, va a generar un momento que producirá el vuelco del autobús.

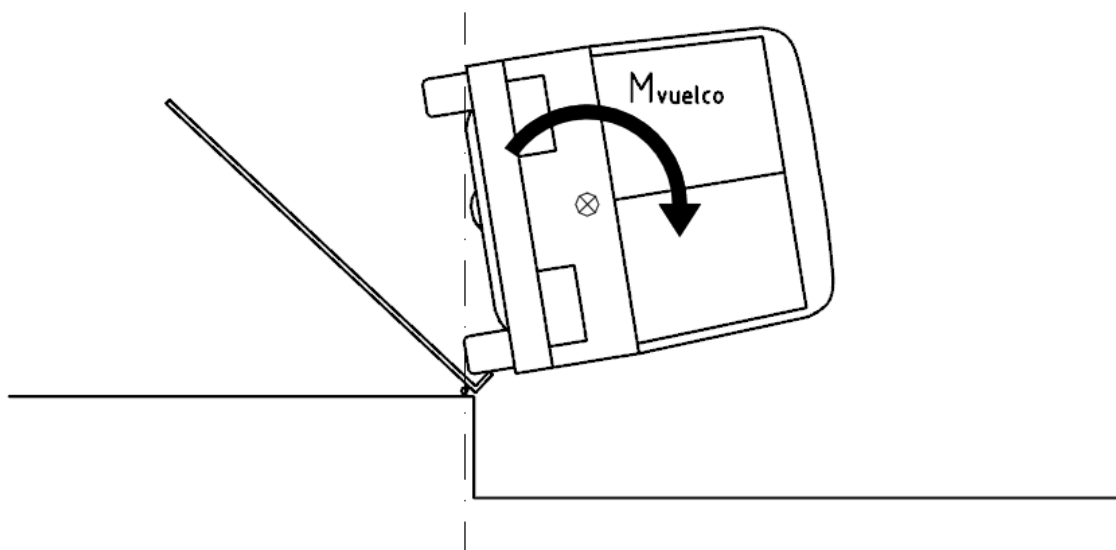


Figura 27: Autobús durante el proceso de vuelco



## Capítulo III: Programa y procedimiento

### 3.1 Elementos finitos

El método de los elementos finitos, también llamado en sus orígenes cálculo matricial de estructuras, surge como respuesta a la creación de los primeros ordenadores digitales en la década de los cincuenta. Esto permite el cálculo automático de estructuras sin tener que recurrir a tediosos métodos de resolución.

Con el método de los elementos finitos, se puede obtener una solución aproximada a problemas complejos, definidos en forma diferencial mediante la división del mismo en pequeños elementos, conectados por puntos denominados nodos. Los nodos pueden pertenecer a distintos elementos. Mediante el mallado del problema con elementos y nodos, puede obtenerse la solución final que será exacta para los nodos y aproximada mediante interpolación para el resto de puntos.

En la actualidad es un método básico y fundamental para el cálculo de problemas de mecánica estructural o mecánica de sólidos, aunque está muy extendido también en el campo de la transferencia de calor. También está cobrando gran importancia en la mecánica de fluidos y electromagnetismo.

### 3.2 Resolución de problemas

Para poder llevar a cabo un problema mediante este método, es necesario introducir una serie de datos de entrada:

- Listado de elementos y nodos, cuyo conjunto constituirá la malla.
- Propiedades de los elementos: hay ciertas propiedades de los elementos que deben quedar definidas para la correcta resolución, como puede ser el espesor, orientación en el espacio o sección transversal.
- Propiedades de los materiales: a cada material se le asignará una serie de propiedades y parámetros para poder simular el comportamiento de los elementos. Algunas de estas propiedades son: el módulo elástico, coeficiente de Poisson o tensión de fluencia.

- Condiciones de contorno: se asignarán a cada nodo una serie de condiciones en cuanto a desplazamientos, que definirán sus grados de libertad, y por otra parte las acciones, que serán las fuerzas o cargas que soportarán los elementos del problema a resolver. Siempre se obtendrá una solución para los desplazamientos y esfuerzos en función de las cargas del problema.
- También habrá que definir otra serie de condiciones como pueden ser velocidades iniciales o temperaturas.

La solución se obtendrá al resolver las  $n$ -ecuaciones con  $n$ -incógnitas generadas en el preproceso al introducir todas las variables y parámetros de entrada. Podrá tratarse de un problema lineal, cuya solución será relativamente sencilla o de un problema no lineal, y por tanto, necesitar asignar a cada incremento de carga un incremento de deformación y desplazamiento, o que dependa del tiempo y por tanto necesitar resolver una sucesión de sistemas de ecuaciones mediante la aplicación de equilibrio en cada instante estudiado.

Finalmente, cabe decir que estos programas generan una gran cantidad de datos e información de salida, la cual deberá ser postprocesada y analizada para poder obtener un resultado coherente. Además, se tiene la opción de generar gráficas e ilustraciones para mejorar el estudio y presentación de los resultados.

### **3.3 Ansys**

Ansys es un programa de ordenador empleado para la simulación de problemas de cualquier disciplina de la ingeniería (Figura 28), por ejemplo: estructuras, vibraciones, dinámica de fluidos, transferencia de calor o electromagnetismo.



Figura 28: Logo de Ansys

La ventaja de emplear programas como Ansys, reside en la posibilidad de testar prototipos y condiciones antes de fabricar los productos. Esto permite representar las condiciones de funcionamiento, así como detectar los posibles problemas o fallos que pueden surgir realizando un test de forma únicamente virtual, con el ahorro económico que ello conlleva.

Una de las grandes ventajas de este software, es la posibilidad de importar diseños CAD en 3D directamente desde otros programas. De esta forma, se puede preprocesarlos directamante para realizar una simulación mediante el método de elementos finitos. Finalmente, también ofrece la posibilidad de generar gráficas y resultados numéricos del ensayo de forma sencilla.

### 3.4 Ls-Dyna y LS-Prepost

El programa empleado para la simulación será LS-Dyna, propiedad de Livermore Software Technology Corporation (LTSC) y Ansys. Se trata de un programa de simulación por elementos finitos, capaz de resolver y analizar problemas complejos de la vida real. Se puede emplear para problemas del ámbito aeroespacial, militar, de la construcción, fabricación, del automóvil, etc. Permite estudiar el comportamiento de casos dinámicos y transitorios, así como no lineales.

Un problema puede ser no lineal cuando hay condiciones de contorno que varían con el tiempo, como puede ser el contacto entre varias piezas o partes. También lo será cuando se produzcan grandes deformaciones, como es el caso de una extrusión o laminado, además de cuando se empleen materiales cuyo comportamiento no sea el elástico lineal, como puede ser el caso de los materiales termoplásticos.

Condiciones transitorias dinámicas se refiere a la posibilidad de analizar casos de corta duración, en los que las fuerzas de inercia cobran gran importancia. Algunos ejemplos podrían ser los impactos de vehículos (Figura 29) o explosiones.

Para introducir las condiciones del ensayo, se utilizará LS-PrePost, programa complemento de LS-Dyna. Este software facilita la introducción de las variables del ensayo como pueden ser los materiales, condiciones de contorno, cargas, etc. Además, permite descargar los datos obtenidos tras el ensayo para poder analizarlos. Se trata de un pre y postprocesador utilizado para dar soporte a LS-Dyna, cuya característica principal es la utilización de una interfaz intuitiva que simplifica el proceso de introducción de datos, evitando tener que emplear la programación en código requerida para utilizar LS-Dyna.

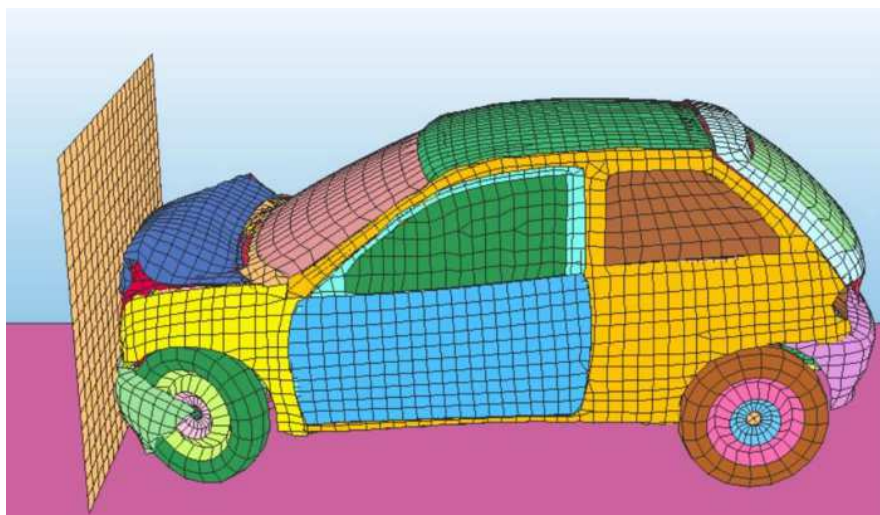


Figura 29: Impacto de un vehículo contra un muro simulado mediante LS-Dyna

### 3.5 Modelo de autobús

Para realizar el ensayo se va a emplear un autobús diseñado en LS-Prepost y proporcionado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid. Las características exteriores del mismo, las cuales servirán para diseñar la plataforma basculante, se pueden observar en las siguientes imágenes. La masa del conjunto del autobús es de 12,787 toneladas. Este dato se ha obtenido gracias al programa LS-Prepost, empleando el comando *Measure* y seleccionando la opción

*Inertia.* En las Figuras 30, 31 y 32 se pueden observar tres vistas con las dimensiones básicas necesarias.

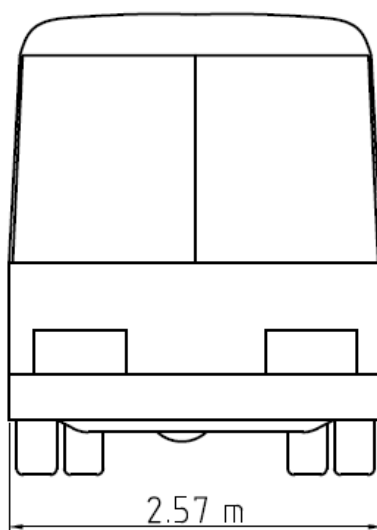


Figura 30: Vista frontal del autobús

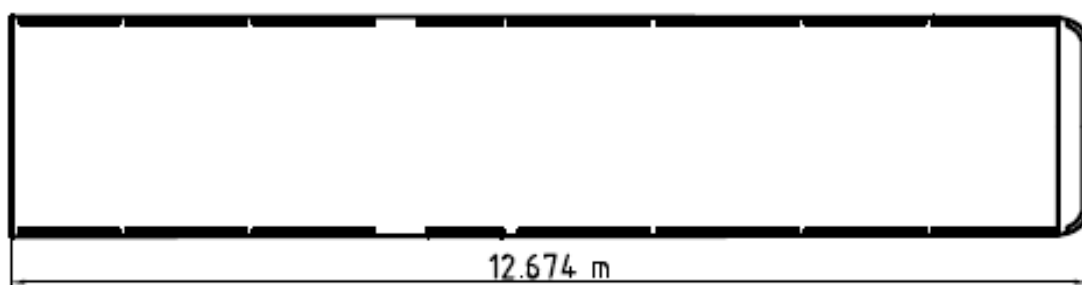


Figura 31: Vista en planta del autobús

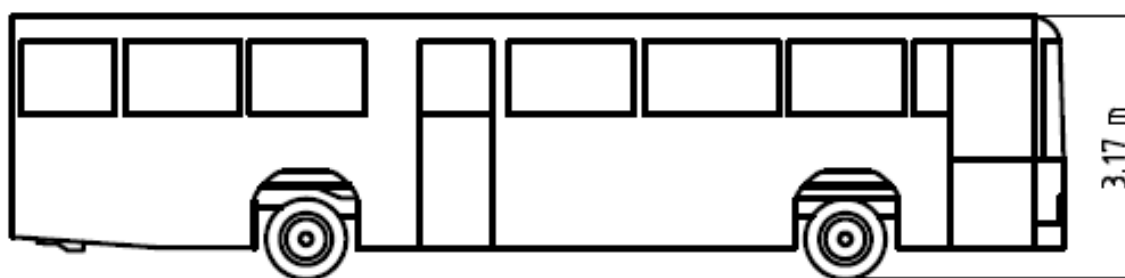


Figura 32: Vista de perfil del autobús

Como se puede observar en la Figura 33, el origen de coordenadas, que se empleará para las futuras referencias necesarias, se encuentra en el centro del

autobús según el plano frontal, a la altura del suelo y al empezar la puerta lateral según el plano longitudinal.

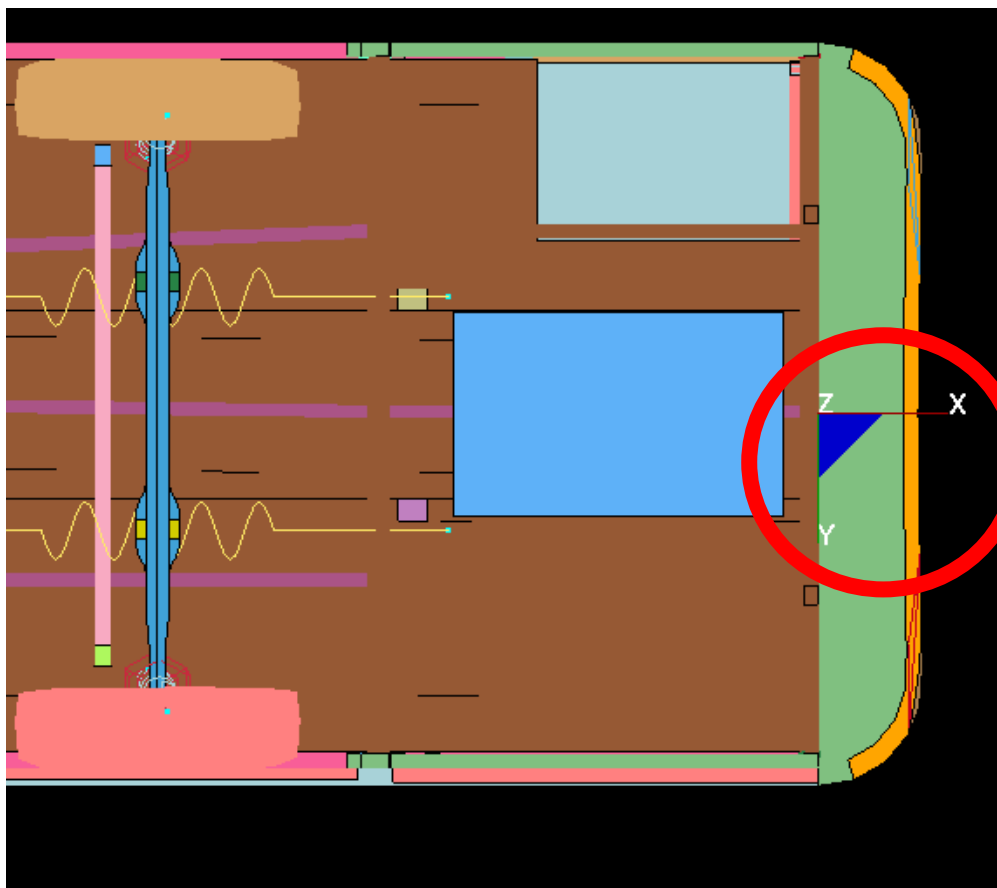


Figura 33: Posición del origen de coordenadas desde la planta inferior

Como se puede comprobar, el eje X coincide con el eje longitudinal del autobús, el eje Y con el transversal y el eje Z con el eje vertical. Por tanto el vuelco se producirá rotando en torno al eje X.

### 3.5.1 Centro de gravedad

Gracias al programa LS-PrePost se puede obtener el centro de gravedad (CDG) del autobús sin necesidad de calcularlo. Para ello se debe entrar en el menú *Element Tools* y seleccionar *Measure* (Figura 34).

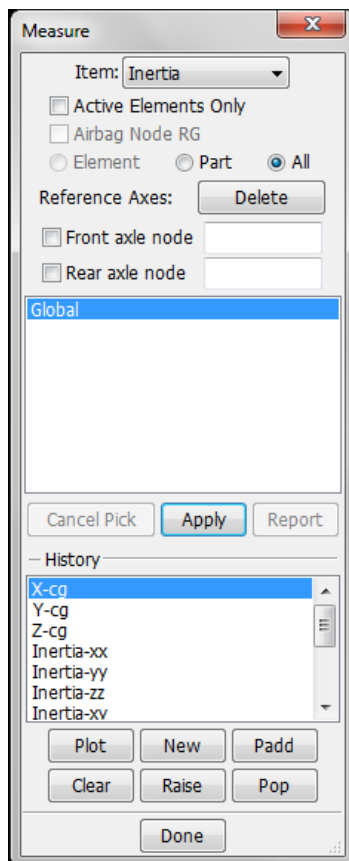


Figura 34: Menú para obtener medidas en LS-Prepost

Como se puede comprobar, se selecciona *Inertia* y la opción *All* para ver el centro de gravedad de todo el conjunto. Además, deberá estar activado *Global*, para obtener las coordenadas con referencia a los ejes globales. Los datos obtenidos son:

$$X_G = -5707.34 \text{ mm}$$

$$Y_G = -9.81587 \text{ mm}$$

$$Z_G = 1189.45 \text{ mm}$$

Como se puede ver en la Figura 35, el centro de gravedad se encuentra algo desplazado hacia la derecha viendo el autobús en la dirección del eje X. Con estos datos ya se puede calcular el ángulo al que deberá colocarse la plataforma de balanceo para que se inicie el vuelco.

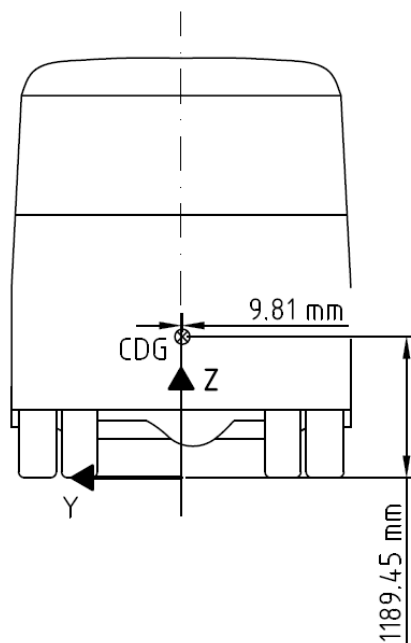


Figura 35: Posición del centro de gravedad

### 3.5.2 Cálculo del ángulo de vuelco

Para calcular el punto inestable a partir del cual el autobús inicia el vuelco, se puede representar la plataforma a tamaño real, para lo cual se empleará Autocad (Figura 36). Posteriormente, bastará con estudiar el movimiento del centro de gravedad al rotar alrededor del punto de pivotamiento. El punto inestable se obtiene, cuando el CDG se alinea con el eje vertical que pasa por el punto de pivotamiento (Figura 37).



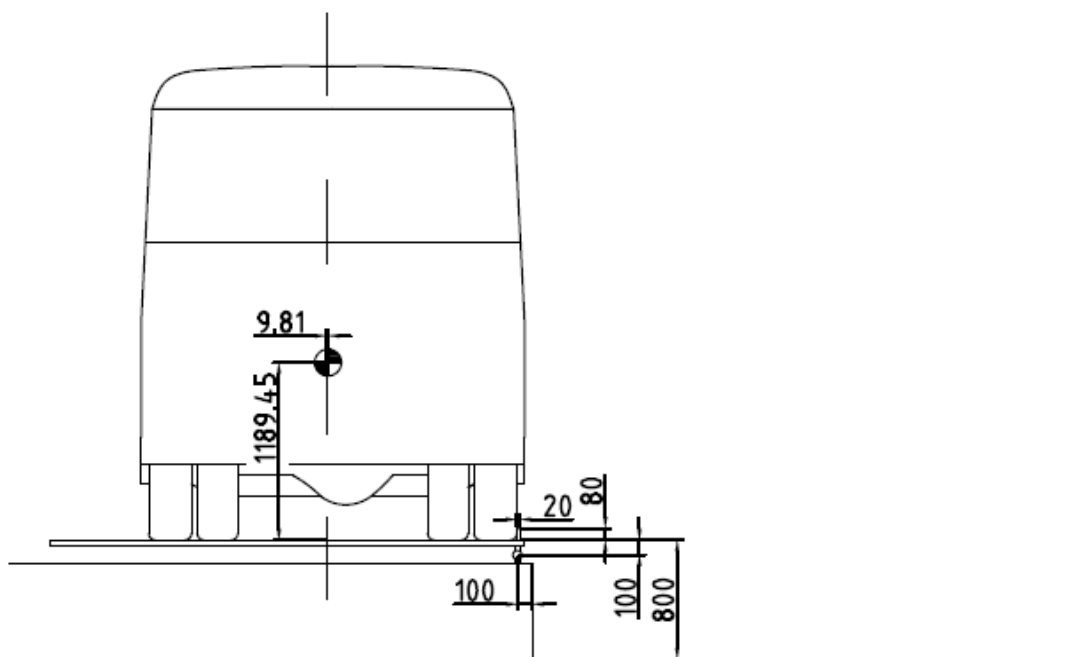


Figura 36: Cotas de plataforma y CDG

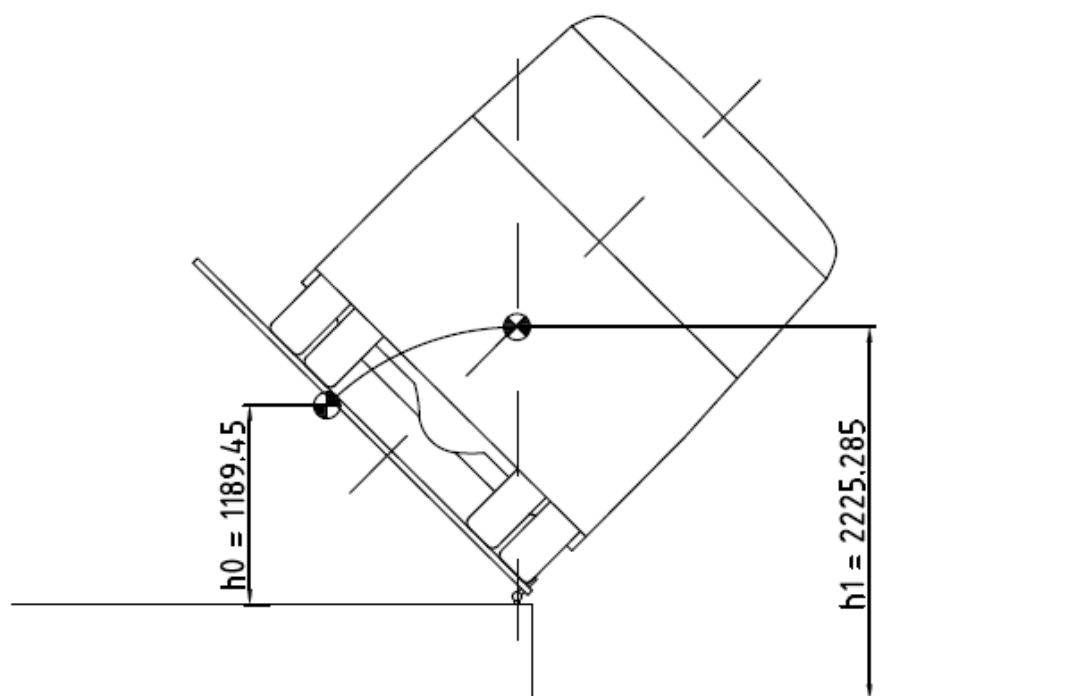


Figura 37: Punto inestable

Como se puede apreciar en la Figura anterior, la altura del centro de gravedad en el punto inestable es de 2225.285 mm. Esta posición se alcanza cuando la plataforma ha rotado  $44,79352^\circ$  (de ahora en adelante  $44,8^\circ$ ).

### 3.5.3 Estructura a estudiar

Aunque en el ensayo se va a emplear un autobús completo, la parte encargada de absorber la energía al impactar contra el suelo, es la estructura que se encuentra entre la parte interior del autobús y la carrocería exterior. Dicha estructura puede observarse en las Figuras 38 y 39.

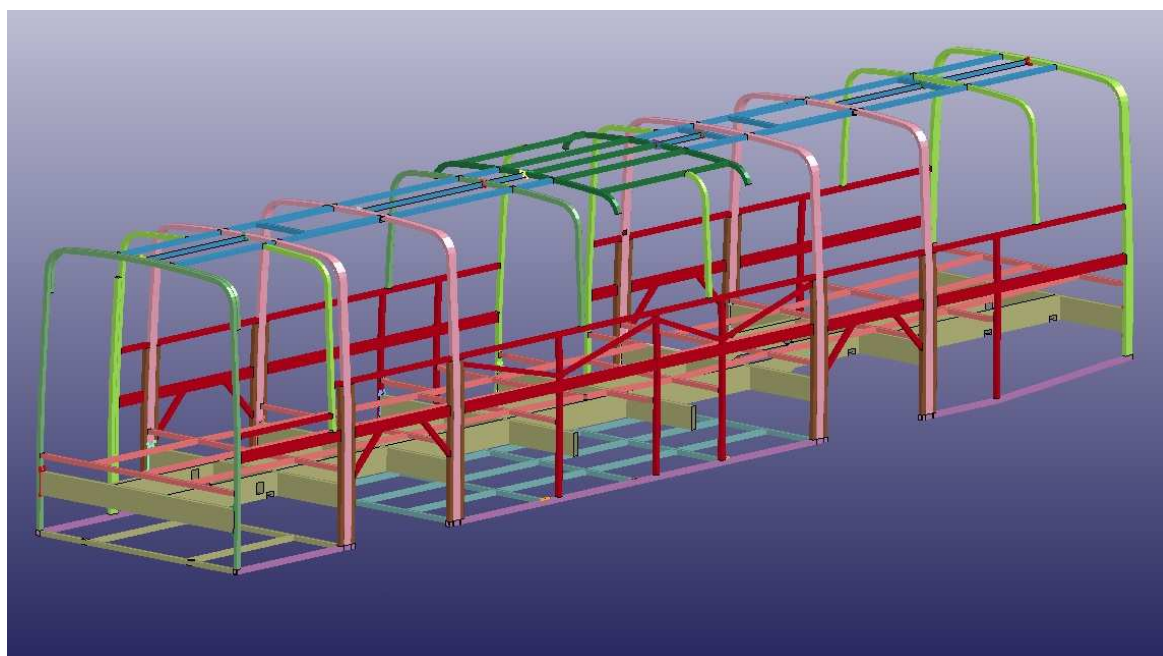


Figura 38: Estructura del autobús

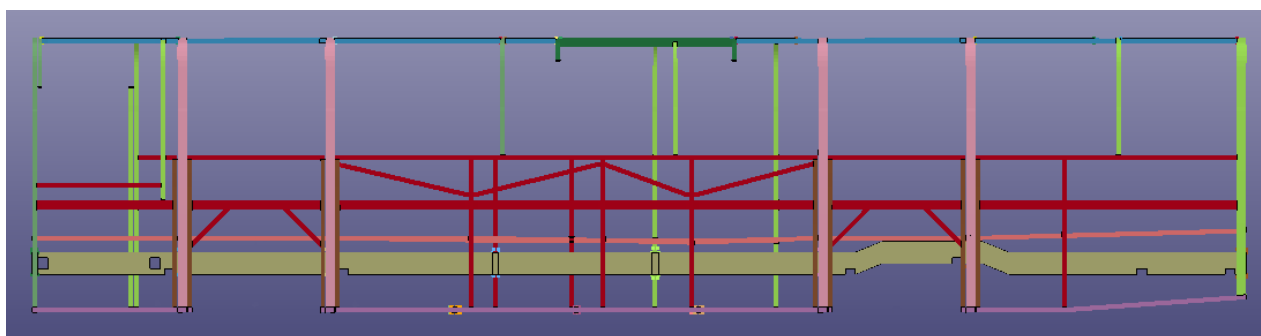


Figura 39: Vista de perfil de la estructura

En las tablas 3 y 4 se resumen las características más destacadas en cuanto a materiales y secciones asignadas a la estructura.

Tabla 3: Lista de materiales de la estructura

| Nº de pieza | Densidad (Tn/mm <sup>3</sup> ) | Módulo elástico (MPa) | Coefficiente De Poisson | Tensión de Fluencia (MPa) | Material | Tipo                  |
|-------------|--------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------|----------|-----------------------|
| 52          | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 610                       | 1        | Plastificación lineal |
| 117         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 118         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 119         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 120         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 121         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 122         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 123         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 124         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 125         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 126         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 127         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 128         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 129         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 130         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 131         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 132         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 133         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 134         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 135         | 7,85E-09                       | 2,07E+05              | 0,28                    | -                         | 3        | Rígido                |
| 136         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 137         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 138         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 139         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 140         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 141         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 142         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |
| 192         | 1,14E-08                       | 2,07E+05              | 0,28                    | 440                       | 2        | Plastificación lineal |

Tabla 4: Lista de secciones de la estructura

| Nº de pieza | Sección | Tipo sección | Espesor (mm) | Color |
|-------------|---------|--------------|--------------|-------|
| 52          | 50      | Shell        | 6,7          |       |
| 117         | 115     | Shell        | 2            |       |
| 118         | 116     | Shell        | 3            |       |
| 119         | 117     | Shell        | 3            |       |
| 136         | 134     | Shell        | 3            |       |
| 137         | 135     | Shell        | 2            |       |
| 138         | 136     | Shell        | 2            |       |
| 139         | 137     | Shell        | 2            |       |
| 140         | 137     | Shell        | 2            |       |
| 141         | 139     | Shell        | 3            |       |
| 142         | 140     | Shell        | 3            |       |
| 192         | 190     | Shell        | 2            |       |

### 3.6 Modelado de la plataforma de vuelco

Para introducir la plataforma de vuelco en LS-Prepost, primero se modelizará en Solid Works, que es un programa de diseño y simulación. A través de LS-Prepost, se importará el archivo para la simulación dinámica. Como simplificación, se ha decidido realizar la plataforma respetando las cotas necesarias según el Reglamento R66, pero diseñándola como un sólido rígido donde la zona en la que se asienta el autobús, se encuentra orientada con el ángulo de vuelco. Esto permitirá comenzar el ensayo directamente desde el punto  $t = 0$ , con energía cinética inicial nula, como pide el Reglamento R66.

Para crear la plataforma, se debe modelizar como superficie plana, utilizando el comando extrusión para las zonas de apoyo de las ruedas. En el preprocesador se asignarán las condiciones de superficie rígida a toda la plataforma, de esta forma los resultados del ensayo serán fiables. El resultado puede observarse en las Figuras 40, 41 y 42.

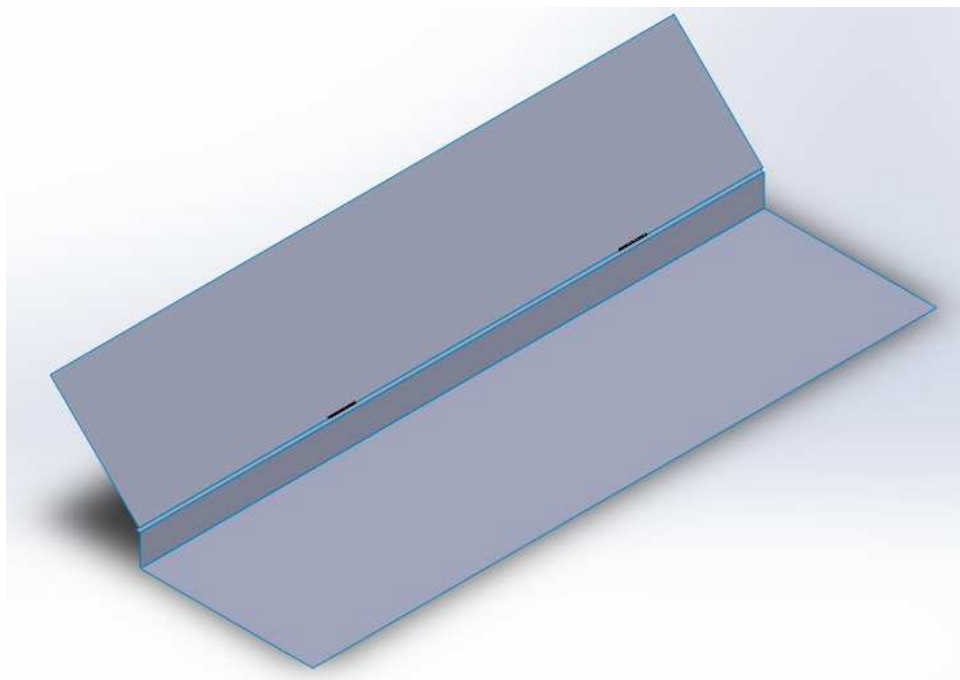


Figura 40: Vista isométrica de la plataforma

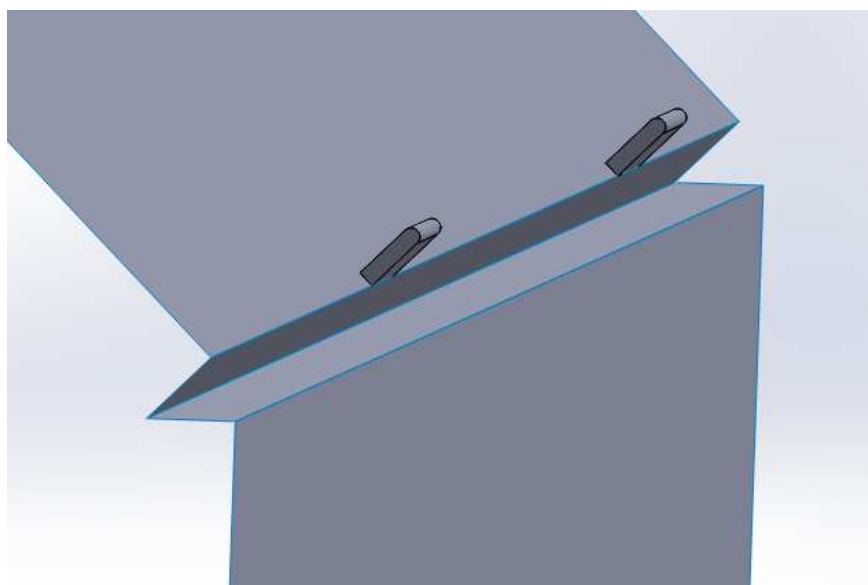


Figura 41: Vista de la inclinación del plano de vuelco y los soportes

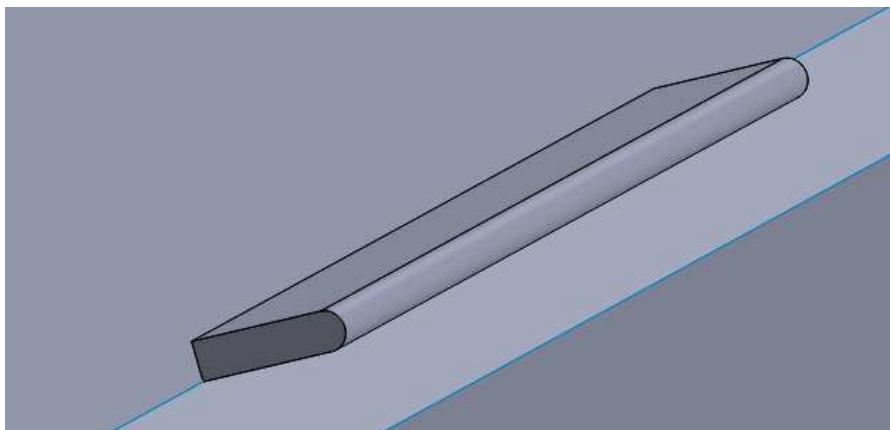


Figura 42: Vista en detalle de un soporte

Durante el diseño de la superficie que sustenta el autobús hasta que se produce el vuelco, se han tenido en cuenta todas las cotas (separación desde el muro vertical, distancia al eje de pivotamiento de la superficie, ángulo de vuelco calculado, etc) y se han ajustado a la posición inicial del ensayo (Figuras 43 y 44).

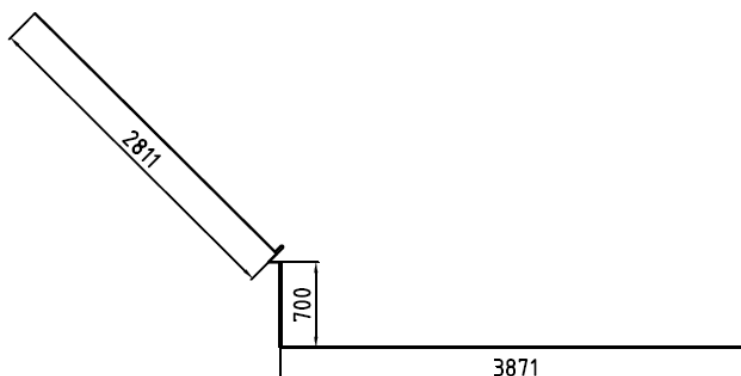


Figura 43: Cotas de la plataforma

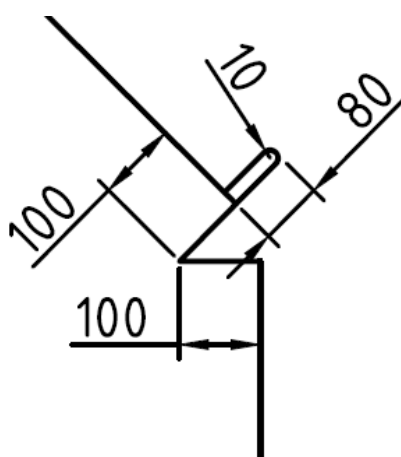


Figura 44: Detalle de los soportes para las ruedas

Finalmente, para que el modelo de la plataforma pueda ser compatible con Ls-Prepost, debe guardarse en formato .iges. De esta manera, se podrá importar y asignar las propiedades del material, sección, etc.

### 3.7 Modelado del espacio de supervivencia

A la hora de diseñar el espacio de supervivencia, se utilizará también Solid Works, para posteriormente importar el archivo directamente desde LS-PrePost. Como se describió en el apartado de condiciones del ensayo, se deben medir ciertas distancias dentro de la carrocería del autobús para confeccionar y diseñar dicho espacio de supervivencia. Las medidas necesarias, se obtienen gracias a LS-Prepost empleando el comando *Measure*.

La estructura del autobús, debe asegurar que tras el ensayo de vuelco, ninguna parte del vehículo penetra en el espacio de supervivencia, es decir, que garantizará la integridad de los pasajeros.

A pesar de que se ha hablado de ello en el apartado de requisitos y especificaciones del ensayo, a continuación, se describe lo que dictamina el reglamento R66 [6] en lo referente al espacio de seguridad de forma más extensa.

El envoltorio del espacio de supervivencia del vehículo, se determinará creando en el interior del vehículo un plano transversal vertical que tenga los márgenes descritos en la Figura 45 y desplazándolo por la longitud del vehículo (Figura 46) como se describe a continuación:

El punto SR estará situado en el respaldo de cada asiento exterior, orientado hacia adelante o hacia atrás (o en la posición supuesta del asiento), 500 mm por encima del piso situado debajo del asiento y a 150 mm de la superficie interior de la pared lateral; no se tendrán en cuenta los pasos de rueda ni demás variaciones de la altura del piso; estas dimensiones también se aplicarán a los asientos orientados hacia el interior, en sus planos centrales;

Cuando los dos lados del vehículo no sean simétricos con respecto a la disposición del piso y, por tanto, la altura de los puntos SR sea diferente, se tomará

como plano central longitudinal vertical del vehículo, el escalón situado entre las dos líneas del piso del espacio de supervivencia (Figura 45);

La posición más atrasada del espacio de supervivencia, es un plano vertical situado 200 mm por detrás del punto SR del asiento exterior más atrasado o la cara interna de la pared trasera del vehículo, cuando esté situada a menos de 200 mm por detrás del punto SR;

La posición más adelantada del espacio de supervivencia, es un plano vertical situado 600 mm por delante del punto SR del asiento más adelantado (ya sea de viajero, conductor o miembro del personal) del vehículo;

Si el asiento más adelantado y el más atrasado en los dos lados del vehículo no se encuentran en los mismos planos transversales, la longitud del espacio de supervivencia en cada lado será diferente;

El espacio de supervivencia entre el plano más atrasado y el más adelantado del compartimento o compartimentos de viajeros, del personal y del conductor es continuo y se determina desplazando, por toda la longitud del vehículo, a lo largo de líneas rectas y a través de los puntos SR situados a ambos lados del vehículo, el plano transversal vertical definido. Detrás del punto SR del asiento más atrasado y delante del punto SR del asiento más adelantado las líneas rectas son horizontales;

Para simular el peor caso en un grupo de tipos de vehículo y permitir futuros avances de diseño, el fabricante podrá definir un espacio de supervivencia mayor de lo necesario para una disposición de asiento determinada.

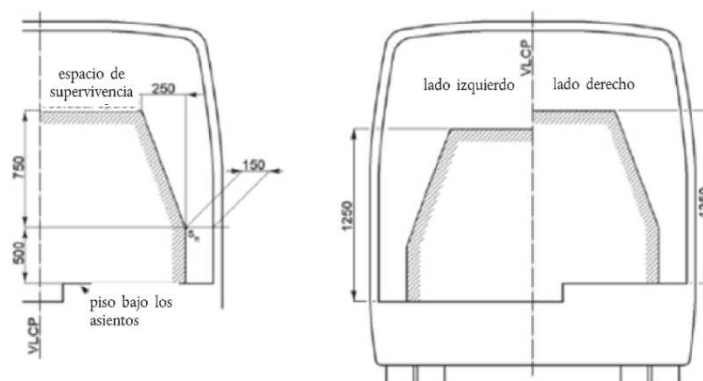


Figura 45: Imágenes 2a y 2c del R66



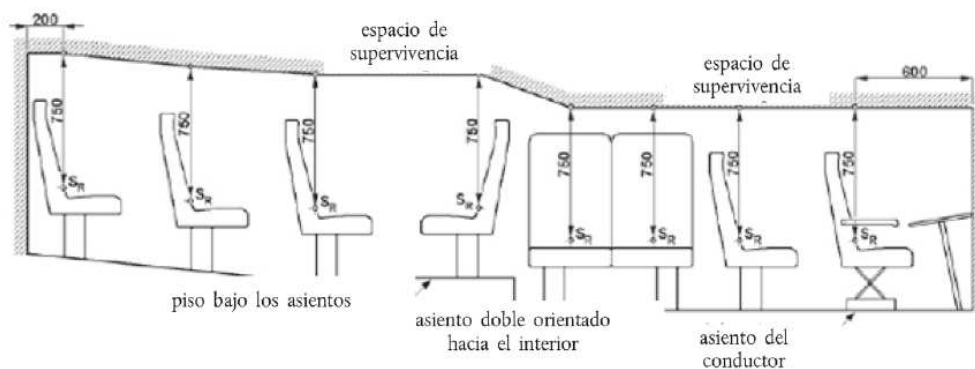


Figura 46: Imagen 2b del R66

Para tomar estas medidas, se utilizarán como referencia los cristales laterales, el delantero y el trasero como puede observarse en la Figura 47.

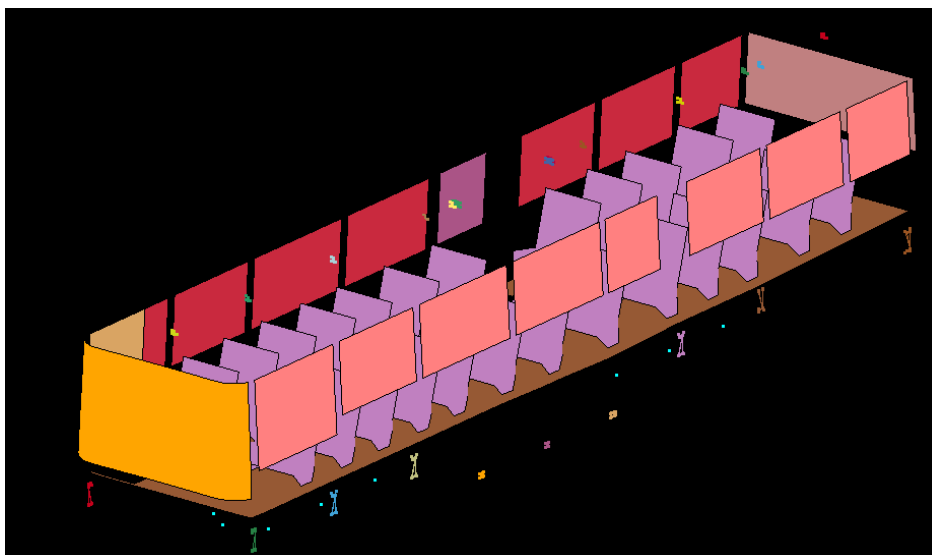


Figura 47: Asientos, suelo y ventanas del autobús

A continuación se muestra un ejemplo de cómo se toman las medidas, en este caso, la distancia entre el último asiento y el cristal trasero (Figura 48). Se debe seleccionar la opción de medir entre dos nodos y además, con referencia a los ejes globales.

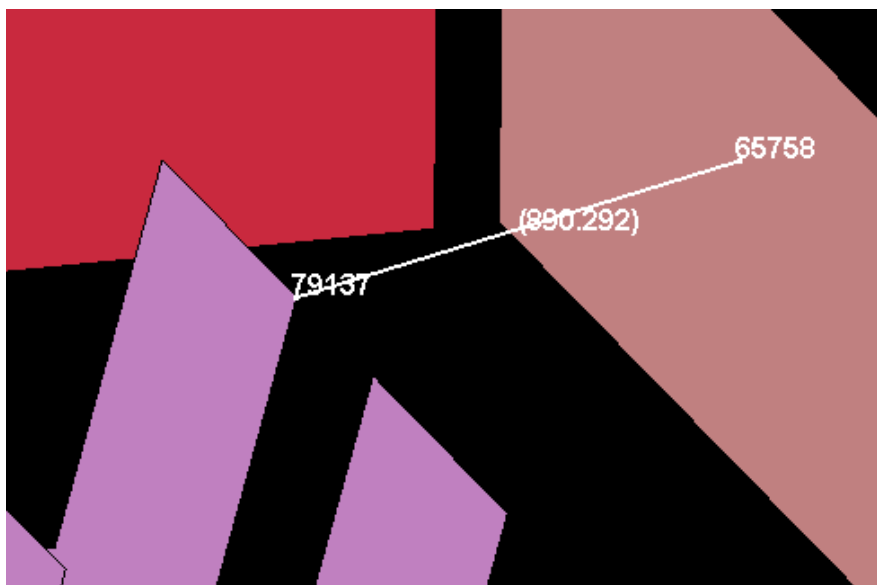


Figura 48: Medición entre el último asiento y el parabrisas trasero

Como la medida no está realizada de forma paralela a un eje, el programa muestra los incrementos de distancia en cada eje (Figura 49). Así, el valor necesario en este caso es el que hace referencia al incremento de longitud en el eje X.

```
measure dist N79137/0 N65758/0 ;
Nid# 79137, xyz=-11688.2998,-307.2640076,2208.449951
Nid# 65758, xyz=-12330.09961,208.9100037,2546.5
dx=-641.8 dy=516.174 dz=338.05 dist=890.292
```

Figura 49: Resultados de la medición entre el último asiento y el parabrisas trasero

De esta forma se van obteniendo todas las medidas necesarias para poder confeccionar el espacio de supervivencia.

El resultado final puede verse en las Figuras 50 y 51, donde se encuentra el diseño 2D realizado con Autocad, y el 3D que será el importado en la simulación, realizado con Solid Works.

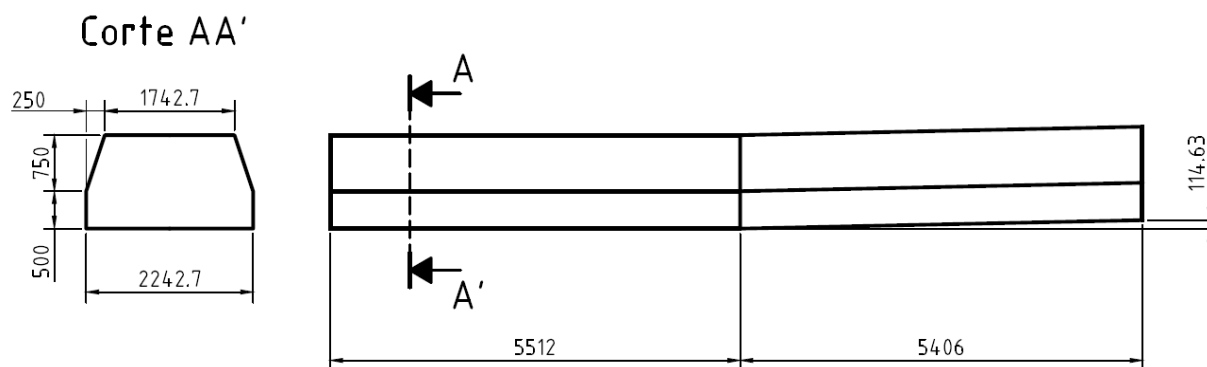


Figura 50: Vistas 2D del espacio de seguridad

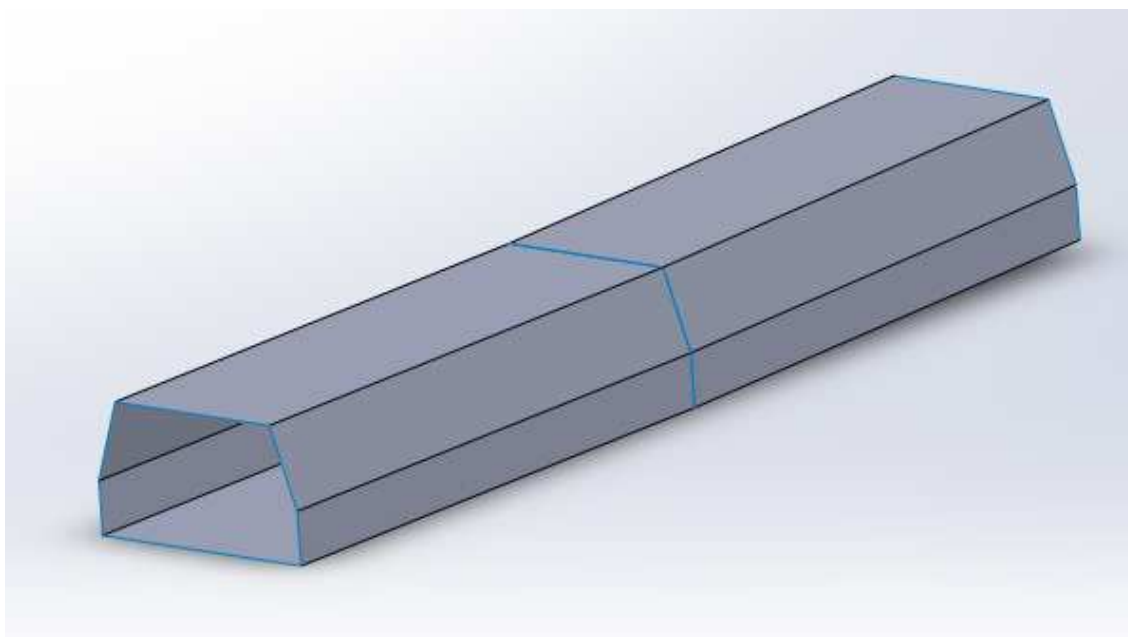


Figura 51: Modelo 3D del espacio de seguridad

Como se describió para la plataforma, es necesario guardar el archivo en formato .iges, para que pueda ser importado posteriormente por Ls-Prepost.

### 3.8 Diagrama de bloques de procedimiento

En la Figura 52 se detallan los pasos seguidos durante el presente capítulo y que resumen las etapas de diseño.

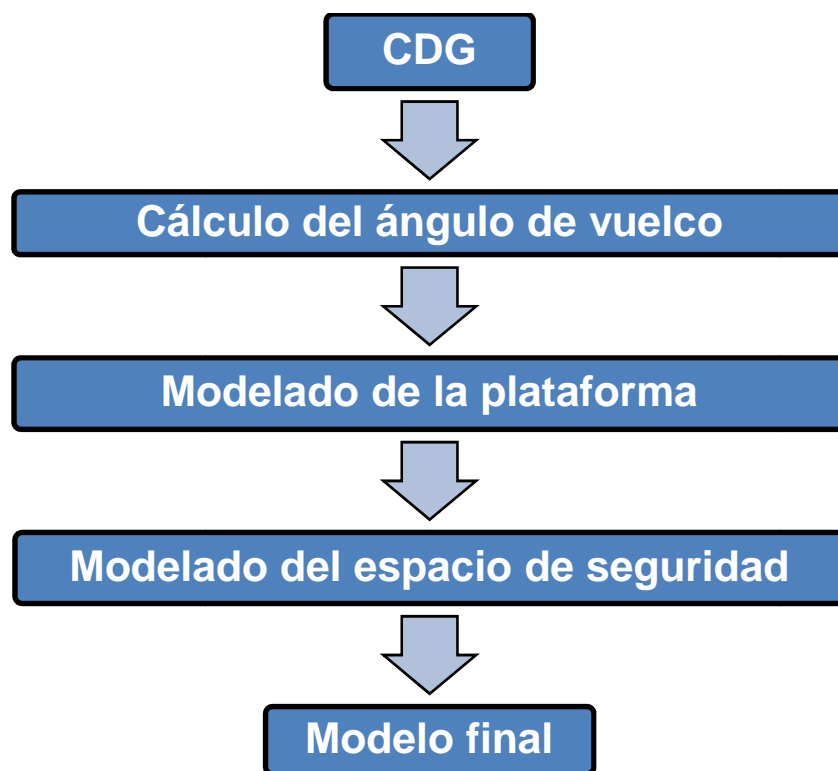


Figura 52: Pasos a seguir en la fase de diseño

## Capítulo IV: Simulación de vuelco de un autobús mediante LS-DYNA

### 4.1 Configuración de LS-Prepost para el ensayo

Para comenzar a introducir los parámetros en LS-Prepost, se debe abrir el archivo de la plataforma y del espacio de seguridad de forma independiente, establecer las unidades y asignarles tipo de elemento. Posteriormente, se deben guardar los archivos con la extensión .k para que sean reconocidos en el programa como “keyword”. Esto permitirá poder utilizarlos más adelante en LS-Prepost, así como asignarles propiedades.

Para la gran mayoría de parámetros, se puede emplear el comando *Old to New* dentro de ayudas. Se trata de una ayuda, que abre una pestaña con todas las opciones necesarias para poder configurar cualquier ensayo de forma intuitiva (Figura 53).

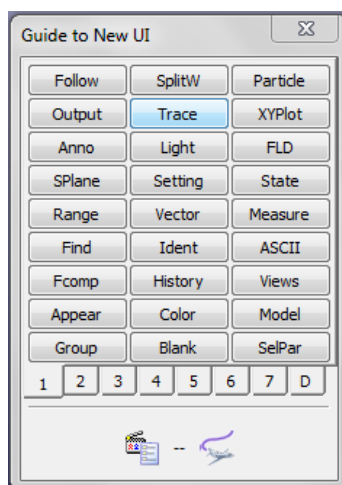


Figura 53: Cuadro de diálogo *Old to New*

### 4.1.1 Configuración de unidades

Para establecer las unidades a emplear, se debe seleccionar la opción *Setting* en la primera pestaña y abrir *Hic/Csi Constants*. Dentro de este desplegable, se asignan las unidades de tiempo y gravedad. Estableciendo estas dos, quedan definidas el resto de unidades (Figura 54). En este caso se ha decidido utilizar el segundo como unidad de tiempo y 9810 como valor de la gravedad, por tanto, la longitud queda definida en milímetros.

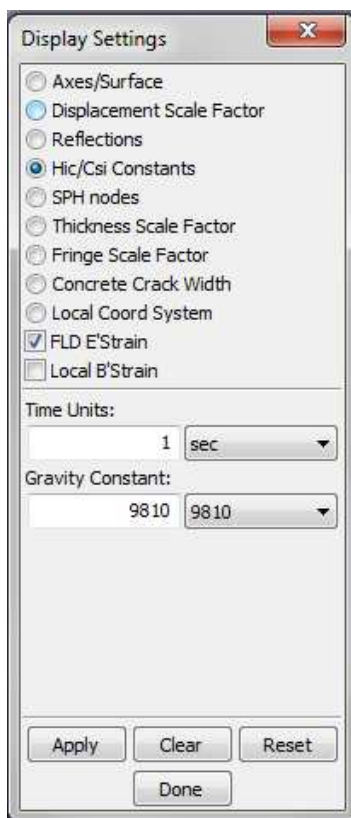


Figura 54: Selección de unidades en LS-Prespost

En la tabla 5 pueden apreciarse las unidades de medida de las magnitudes más utilizadas, las cuales se emplearán desde aquí hasta el final del presente proyecto.

Tabla 5: Unidades a utilizar en LS-Prepost

| Magnitud | Unidad                  |
|----------|-------------------------|
| Tiempo   | s                       |
| Longitud | mm                      |
| Gravedad | 9810 mm/s <sup>2</sup>  |
| Masa     | Tn                      |
| Densidad | Tn/mm <sup>3</sup>      |
| Fuerza   | N                       |
| Tensión  | N/mm <sup>2</sup> = MPa |
| Energía  | N·mm = KJ               |

### 4.1.2 Importación de la plataforma

Lo primero será importar el archivo de la plataforma mediante el comando *Import* y realizar el mallado. En este caso, se selecciona *SurMesh* en la pestaña 7 y se elige un tamaño de elemento de 300 (Figura 55).

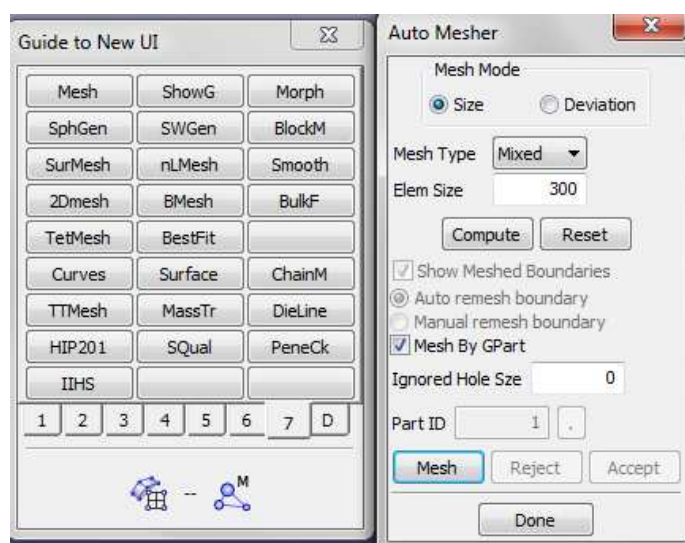


Figura 55: Selección de características de mallado

El siguiente paso será crear el material, para ello se debe abrir la opción *Keyword* alojada en la pestaña 3. En esta opción, se pueden ver tanto las propiedades asignadas al modelo, como las que se pueden asignar. Para crear el material de la plataforma, se debe abrir *MAT* y seleccionar material rígido (Figura 56), ya que es lo

que establece el Reglamento R66. En el desplegable se introducirán las propiedades características de un material rígido (Figura 57).

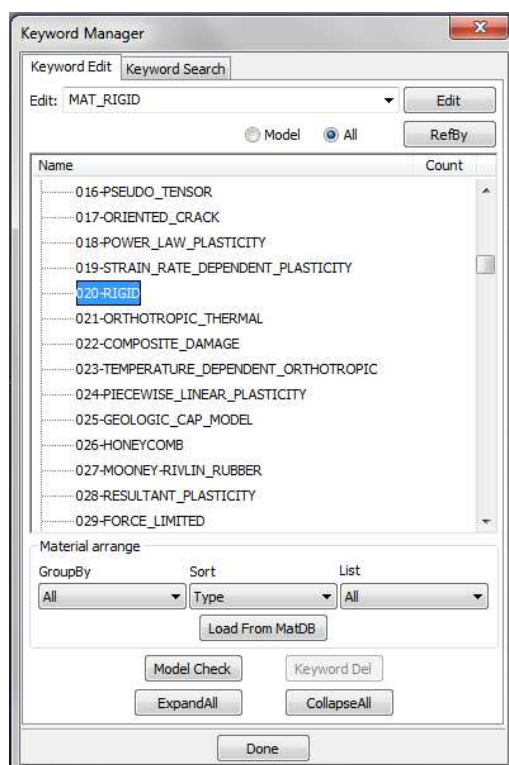
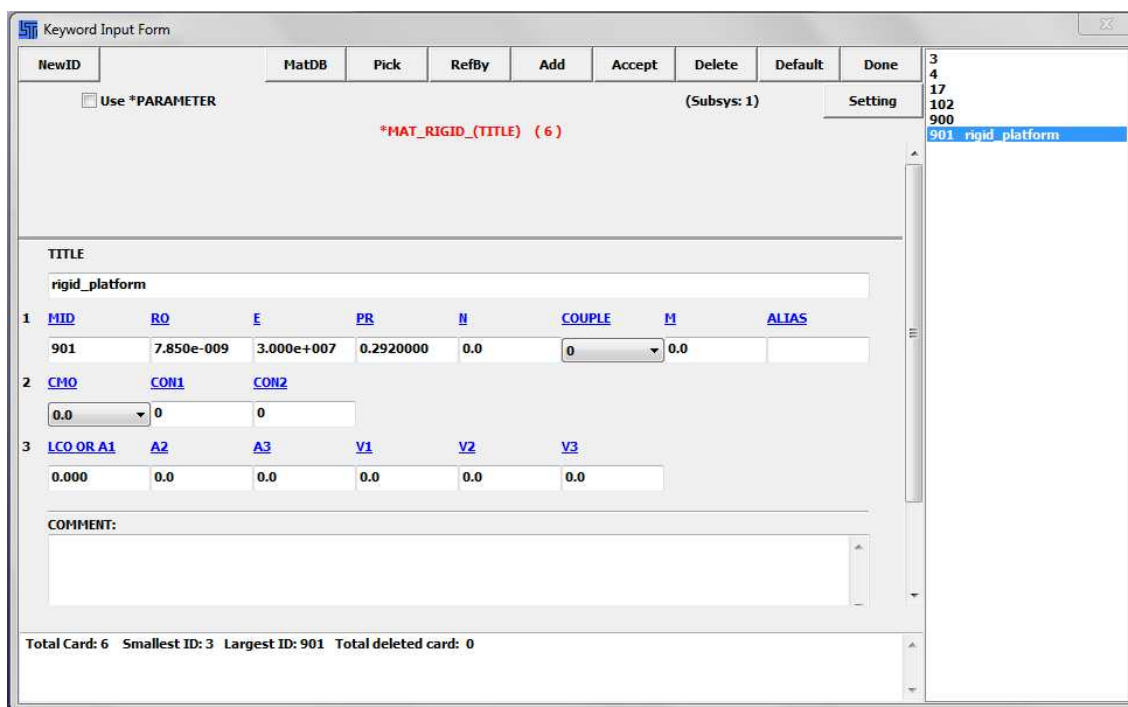


Figura 56: Selección de material



| 1   | MID        | RO         | E         | PR  | N | COUPLE | M | ALIAS |
|-----|------------|------------|-----------|-----|---|--------|---|-------|
| 901 | 7.850e-009 | 3.000e+007 | 0.2920000 | 0.0 | 0 | 0.0    |   |       |

| 2   | CMO | CON1 | CON2 |
|-----|-----|------|------|
| 0.0 | 0   | 0    |      |

| 3     | LCO OR A1 | A2  | A3  | V1  | V2  | V3  |
|-------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0.000 | 0.0       | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

COMMENT:

Total Card: 6   Smallest ID: 3   Largest ID: 901   Total deleted card: 0

Figura 57: Propiedades asignadas a la plataforma

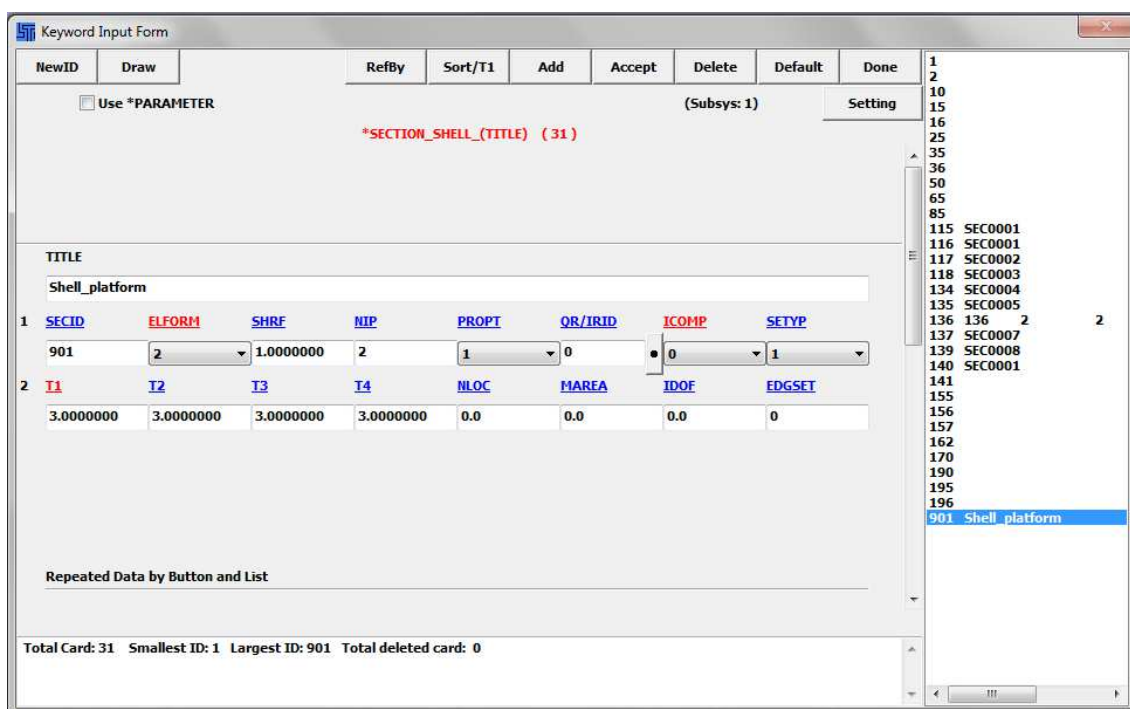


Las propiedades que se han definido para el material rígido en la Figura 57, que se asignarán a la plataforma, son las que se resumen en la Tabla 6, introducidas según el sistema de unidades adoptado al inicio del presente capítulo.

Tabla 6: Propiedades de material rígido

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| <b>Módulo elástico</b>         | $E = 30 \cdot 10^6 \text{ MPa}$              |
| <b>Coefficiente de Poisson</b> | $\nu = 0.292$                                |
| <b>Densidad</b>                | $\rho = 7,850 \cdot 10^{-9} \text{ Tn/mm}^3$ |

Tras haber introducido el material, se procede a crear una sección y finalmente asignar ambos a la pieza. Para la plataforma, se debe crear una sección tipo placa. Para ello, dentro de *Keyword* se selecciona *Section* y tipo *Shell*. En el menú se asigna un nombre a la sección y se especifica un espesor (Figura 58). En este caso se ha introducido un espesor de 3 mm, ya que será suficientemente resistente dadas las propiedades asignadas.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*SECTION\_SHELL\_(TITLE) ( 31 )

TITLE

Shell\_platform

| 1   | SECID | ELFORM     | SHRF | NIP | PROPT | QR/IRID | ICOMP | SETYP |
|-----|-------|------------|------|-----|-------|---------|-------|-------|
| 901 | 2     | 1.00000000 | 2    | 1   | 0     | 0       | 1     |       |

| 2          | T1         | T2         | T3         | T4  | NLOC | MAREA | IDOF | EDGSET |
|------------|------------|------------|------------|-----|------|-------|------|--------|
| 3.00000000 | 3.00000000 | 3.00000000 | 3.00000000 | 0.0 | 0.0  | 0.0   | 0    |        |

Repeated Data by Button and List

Total Card: 31 Smallest ID: 1 Largest ID: 901 Total deleted card: 0

115 SEC0001  
116 SEC0001  
117 SEC0002  
118 SEC0003  
134 SEC0004  
135 SEC0005  
136 136 2 2  
137 SEC0007  
139 SEC0008  
140 SEC0001  
141  
155  
156  
157  
162  
170  
190  
195  
196  
901 Shell\_platform

Figura 58: Parámetros de sección

Una vez que se ha creado el material y la sección, se deben asignar a una pieza. Para ello, dentro de *Keyword*, se selecciona la opción *Part* y se rellenan los

campos con el número de identificación con los que se ha designado tanto el material como la sección (Figura 59).

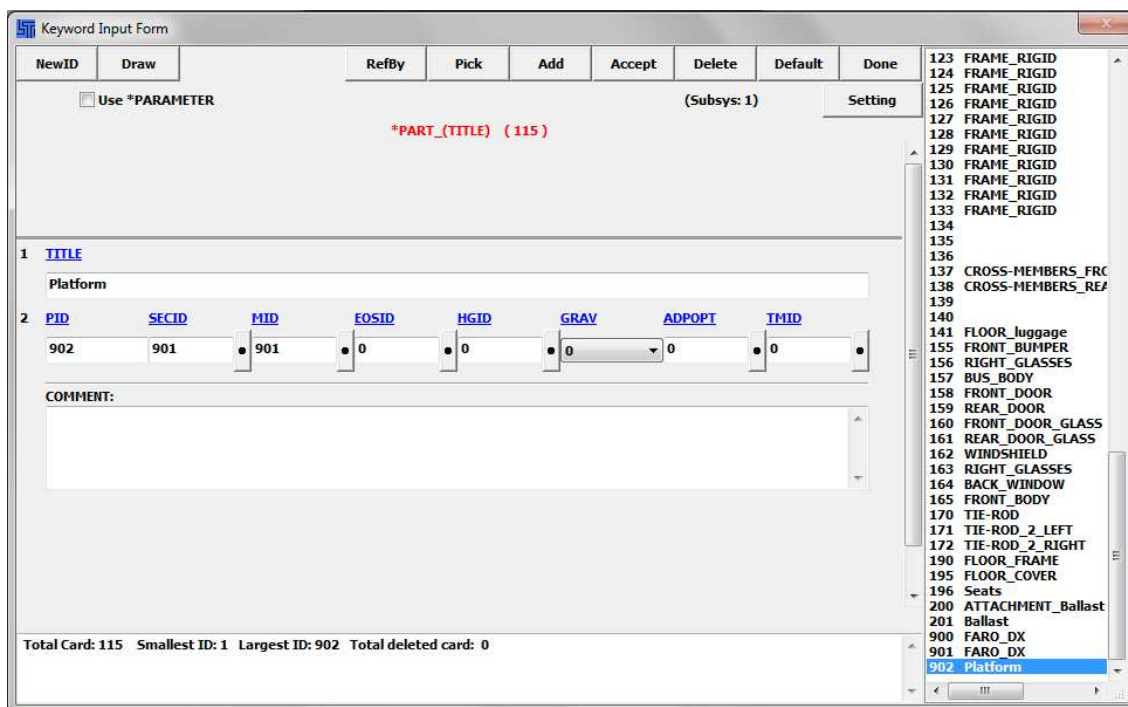
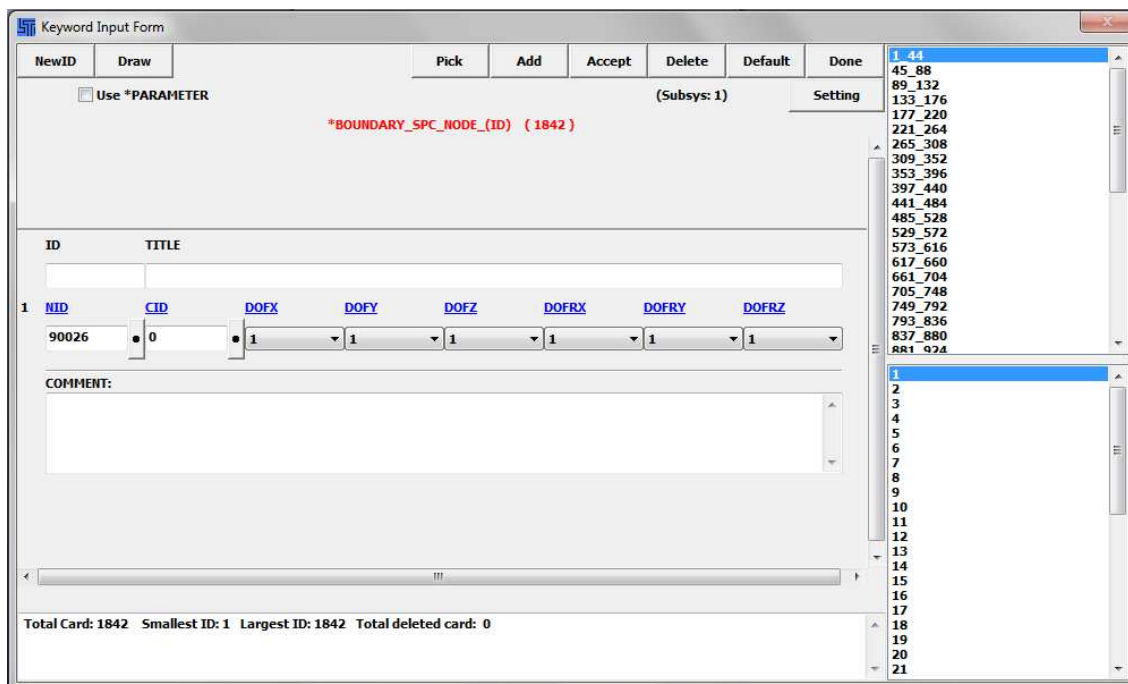


Figura 59: Asignación de propiedades de pieza

Finalmente se deben disponer las restricciones al movimiento de la plataforma, puesto que esta deberá permanecer inmóvil durante todo el ensayo. Para ello, se debe abrir *BOUNDARY* y seleccionar *SPC\_SET*. En la pantalla, se deben restringir los movimientos y rotaciones en los 3 ejes y seleccionar la pieza en la que se deben aplicar las condiciones de contorno (Figura 60). Lo último será la creación de un conjunto (*SET*), que será referenciado desde las condiciones de contacto.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

**\*BOUNDARY\_SPC\_NODE (1842)**

| ID    | TITLE                                    |
|-------|--|
| 1     | NID CID DOFX DOFY DOFZ DOFRX DOFRY DOFRZ |
| 90026 | 0 1 1 1 1 1 1                            |

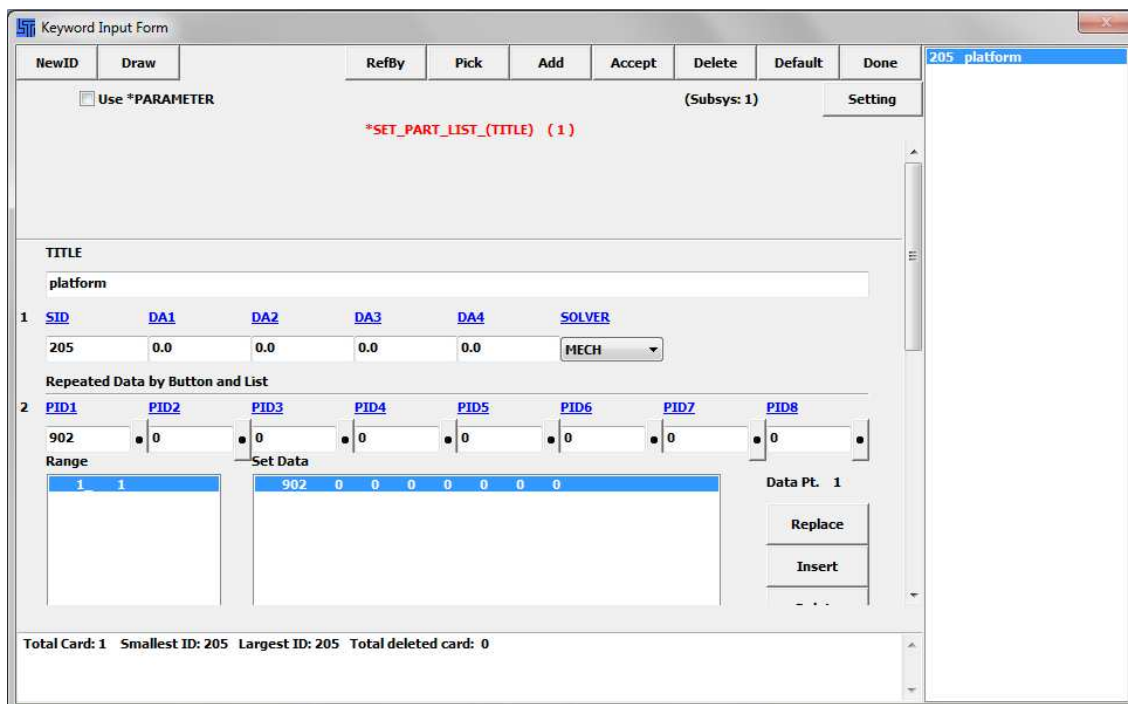
COMMENT:

Total Card: 1842 Smallest ID: 1 Largest ID: 1842 Total deleted card: 0

Node IDs: 1, 44, 45, 88, 89, 132, 133, 176, 177, 220, 221, 264, 265, 308, 309, 352, 353, 396, 397, 440, 441, 484, 485, 528, 529, 572, 573, 616, 617, 660, 661, 704, 705, 748, 749, 792, 793, 836, 837, 880, 881, 924

Figura 60: Restricción de movimientos

Para realizar el *SET* mencionado, se selecciona *SET\_PART\_LIST* para que sea un conjunto de una lista de piezas, aunque en este caso será sólo una (Figura 61). Este *SET* será el conjunto que se nombrará como *Master* a la hora de aplicar el contacto entre el autobús y la plataforma.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

**\*SET\_PART\_LIST (TITLE) (1)**

TITLE: platform

| 1 | SID | DA1 | DA2 | DA3 | DA4 | SOLVER |
|---|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 1 | 205 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | MECH   |

Repeated Data by Button and List

| 2 | PID1 | PID2 | PID3 | PID4 | PID5 | PID6 | PID7 | PID8 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 902  | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |

Range: 1 1 Set Data: 902 0 0 0 0 0 0 0 0

Data Pt. 1: Replace Insert

Total Card: 1 Smallest ID: 205 Largest ID: 205 Total deleted card: 0

Figura 61: Set de pieza

Una vez realizadas estas configuraciones, se debe guardar el archivo con la extensión .k, que es la que a su vez leerá posteriormente LS-Dyna. La plataforma ya se encuentra lista para ser importada en la simulación.

### 4.1.3 Importación del espacio de seguridad

Es necesario saber que el espacio de seguridad no debe influir en la resolución del modelo, por ello hay dos opciones a la hora de proceder. La primera de ellas sería comprobar directamente tras el ensayo, a través de mediciones o introduciéndolo en el autobús en el momento final, permitiendo comprobar la intrusión por parte de la estructura. La segunda opción será la que se expone a continuación.

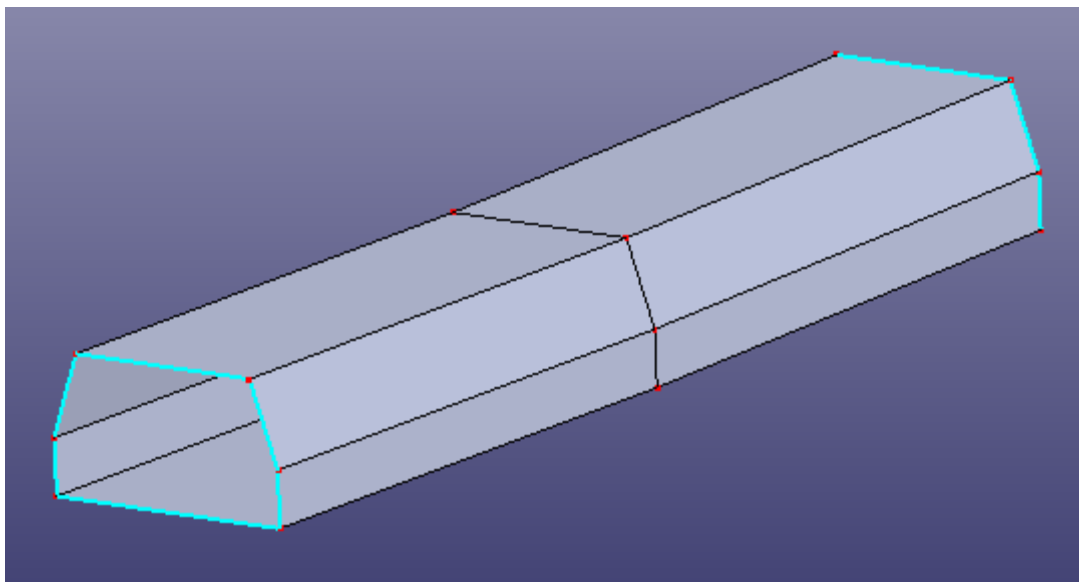
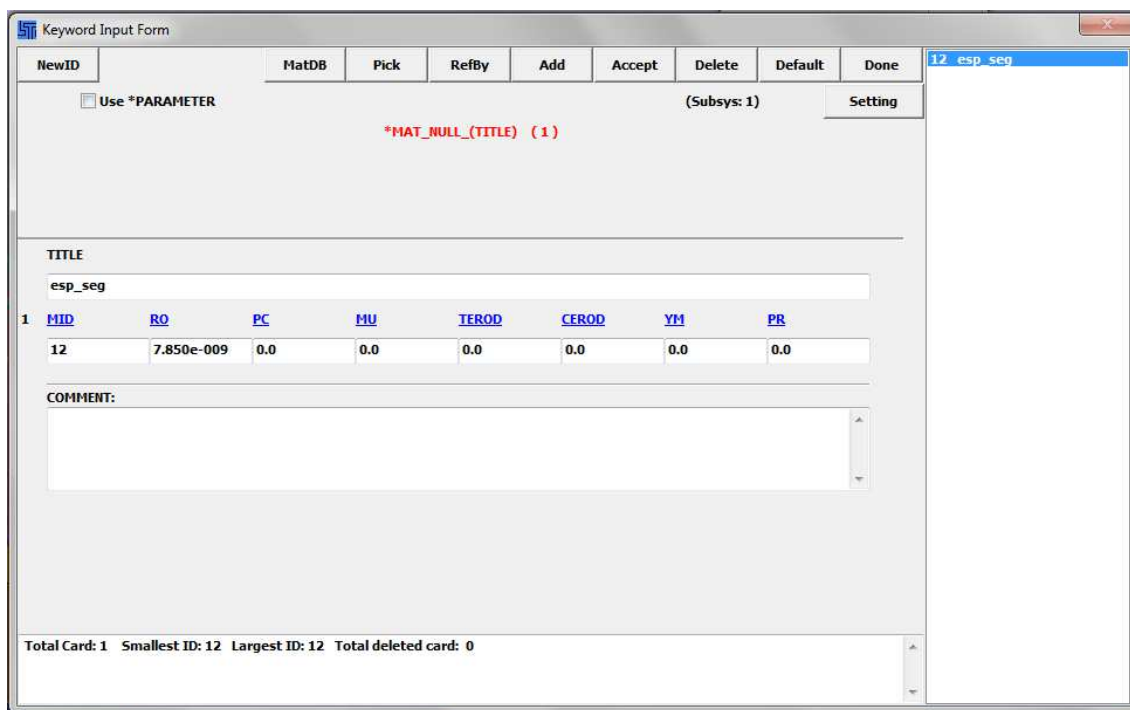


Figura 62: Visualización del espacio de seguridad en LS-Prepost

Para importar el espacio de seguridad (Figura 62), primero debe abrirse desde LS-Prepost el autobús y seleccionar *Import*. En la versión 3.1 que se está utilizando, no existe la posibilidad de asignar un tipo de elemento que sea únicamente de visualización y no influya en la simulación, por tanto se asignará un material tipo nulo y una sección tipo *Shell* con un espesor reducido. Para ello, se selecciona *MAT* → *009\_NULL*. La única característica necesaria para definir este tipo de material es la densidad. Como se va a asignar un espesor muy pequeño, el valor de la densidad no será relevante y se introducirá el mismo que al material rígido de la plataforma (Figura

63). El siguiente paso será la creación de la sección a asignar al espacio de seguridad. Esta será tipo *Shell* con un espesor de 0.5 mm (Figura 64).

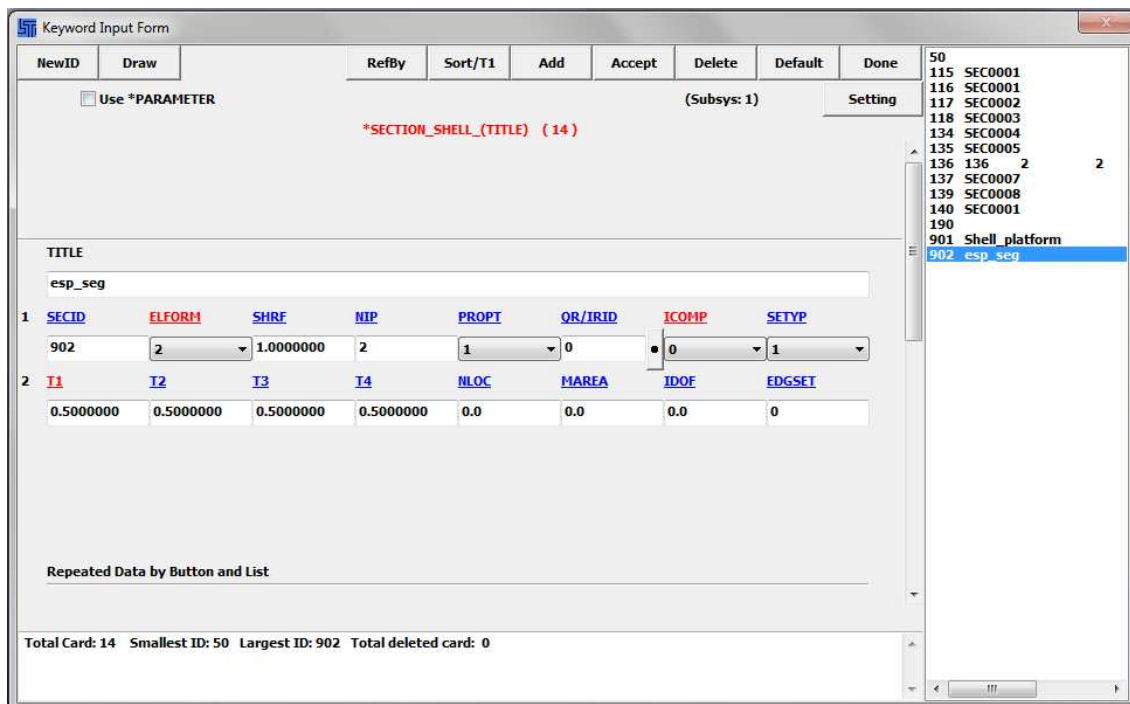


The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window for creating a material. The title bar is 'Keyword Input Form'. The top menu bar includes 'NewID', 'MatDB', 'Pick', 'RefBy', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. The 'Add' button is highlighted. The 'Use \*PARAMETER' checkbox is checked. The 'Subsys: 1' label is present. The 'Setting' button is visible. The main area displays the keyword '\*MAT\_NULL\_(TITLE) ( 1 )'. Below this, the 'TITLE' field is set to 'esp\_seg'. A table of material properties is shown:

| 1  | MID        | RO  | PC  | MU  | TEROD | CEROD | YM  | PR  |
|----|------------|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|
| 12 | 7.850e-009 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0   | 0.0   | 0.0 | 0.0 |

The 'COMMENT:' field is empty. At the bottom, the status bar shows: 'Total Card: 1 Smallest ID: 12 Largest ID: 12 Total deleted card: 0'.

Figura 63: Creación de material nulo



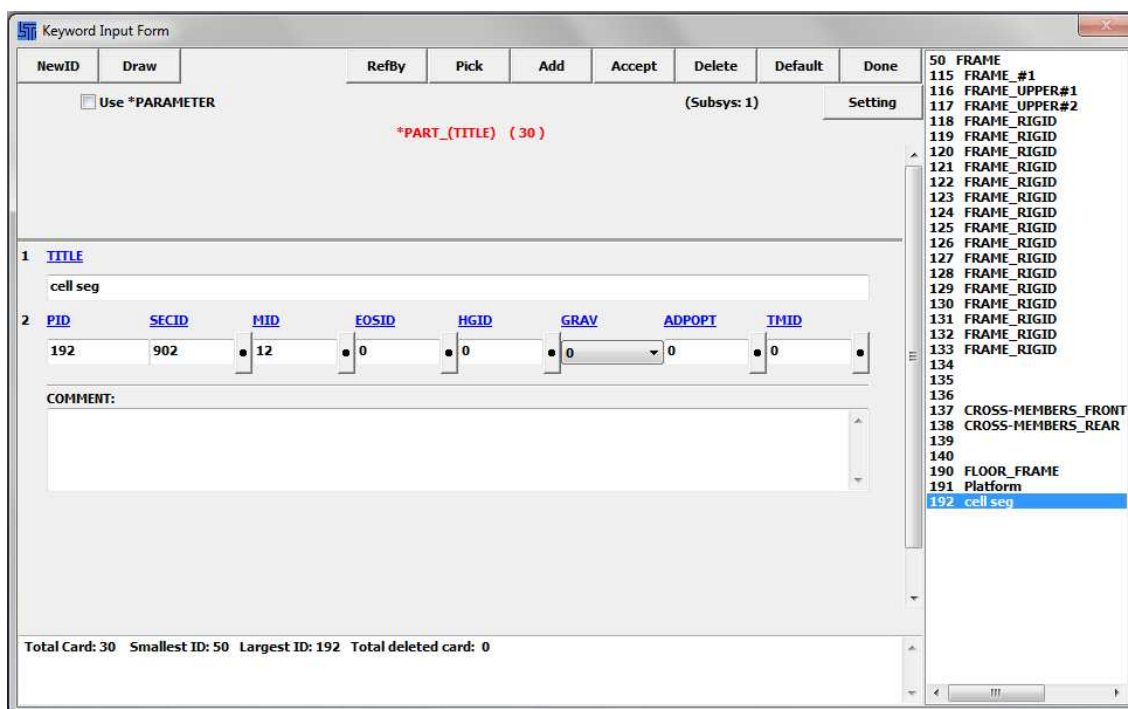
The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window for creating a section. The title bar is 'Keyword Input Form'. The top menu bar includes 'NewID', 'Draw', 'RefBy', 'Sort/T1', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. The 'Add' button is highlighted. The 'Use \*PARAMETER' checkbox is checked. The 'Subsys: 1' label is present. The 'Setting' button is visible. The main area displays the keyword '\*SECTION\_SHELL\_(TITLE) ( 14 )'. Below this, the 'TITLE' field is set to 'esp\_seg'. A table of section properties is shown:

| 1   | SECID | ELFORM    | SHRF | NIP | PROPT | QR/IRID | ICOMP | SETYP |
|-----|-------|-----------|------|-----|-------|---------|-------|-------|
| 902 | 2     | 1.0000000 | 2    | 1   | 0     | 0       | 0     | 1     |

Below the table, there is a section for 'Repeated Data by Button and List' with fields for T1, T2, T3, T4, NLOC, MAREA, IDOF, and EDGSET. The values are: T1=0.5000000, T2=0.5000000, T3=0.5000000, T4=0.5000000, NLOC=0.0, MAREA=0.0, IDOF=0.0, EDGSET=0. At the bottom, the status bar shows: 'Total Card: 14 Smallest ID: 50 Largest ID: 902 Total deleted card: 0'.

Figura 64: Creación de sección para el espacio de seguridad

Posteriormente, se debe crear la pieza y seleccionar tanto el material creado, como la sección (Figura 65). Para terminar, se empleará la restricción *SPOT\_WELD* para dar diversos puntos sobre la estructura y conseguir que el espacio de seguridad se mueva solidario con ella. A pesar de lo mencionado, el espacio de seguridad no interferirá en los resultados, ya que no se seleccionará dentro del *SET\_PART* referenciado por la condición de contacto.



The screenshot shows the 'Keyword Input Form' window. At the top, there are buttons for 'NewID', 'Draw', 'RefBy', 'Pick', 'Add', 'Accept', 'Delete', 'Default', and 'Done'. Below these, there is a 'Use \*PARAMETER' checkbox and a '(Subsys: 1)' label. The main area displays the title '\*PART\_(TITLE) (30)'. Below this, there is a section for '1 TITLE' with a 'cell seg' label. A second section, '2 PID', contains input fields for 'SECID' (902), 'MID' (12), 'EOSID' (0), 'HGID' (0), 'GRAV' (0), 'ADPOPT' (0), and 'TMID' (0). A 'COMMENT:' field is also present. On the right side, a list of parts is shown, including '50 FRAME', '115 FRAME\_#1', '116 FRAME\_UPPER#1', '117 FRAME\_UPPER#2', '118 FRAME\_RIGID', '119 FRAME\_RIGID', '120 FRAME\_RIGID', '121 FRAME\_RIGID', '122 FRAME\_RIGID', '123 FRAME\_RIGID', '124 FRAME\_RIGID', '125 FRAME\_RIGID', '126 FRAME\_RIGID', '127 FRAME\_RIGID', '128 FRAME\_RIGID', '129 FRAME\_RIGID', '130 FRAME\_RIGID', '131 FRAME\_RIGID', '132 FRAME\_RIGID', '133 FRAME\_RIGID', '134', '135', '136', '137 CROSS-MEMBERS\_FRONT', '138 CROSS-MEMBERS\_REAR', '139', '140', '190 FLOOR\_FRAME', '191 Platform', and '192 cell seg'. The status bar at the bottom indicates 'Total Card: 30', 'Smallest ID: 50', 'Largest ID: 192', and 'Total deleted card: 0'.

Figura 65: Creación de la pieza espacio de seguridad

Para terminar la configuración del espacio de seguridad, se debe introducir en su posición dentro del autobús. Para realizarlo, se utilizan los comandos de la pestaña 2, dentro de la opción *Translt*. Estos comandos se explicarán detenidamente en el punto 4.1.4, en el momento de colocar el autobús en la posición de equilibrio inestable, ya que se empleará tanto rotación como traslación y será más completo. En la Figura 66 se observa el conjunto de autobús y espacio de seguridad.

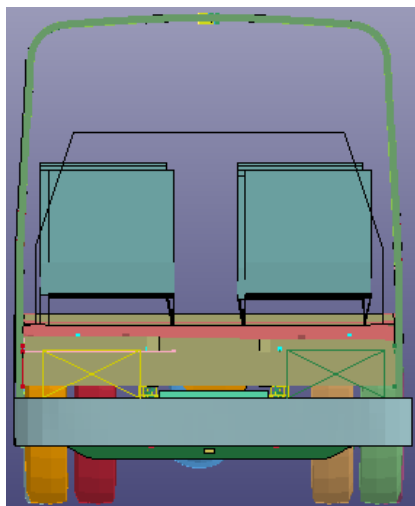


Figura 66: Autobús con espacio de seguridad

#### 4.1.4 Condiciones finales del ensayo

Una vez se ha introducido el espacio de seguridad en el autobús, únicamente queda asignar las condiciones finales del ensayo. Lo primero que se debe realizar será colocar el autobús en el punto inicial del ensayo, es decir, en el punto inestable a partir del cual se iniciará el vuelco. De esta forma nos aseguramos que el ensayo comienza con energía cinética nula. Cuando se importa el autobús, aparece en su centro de coordenadas propio (Figura 67).

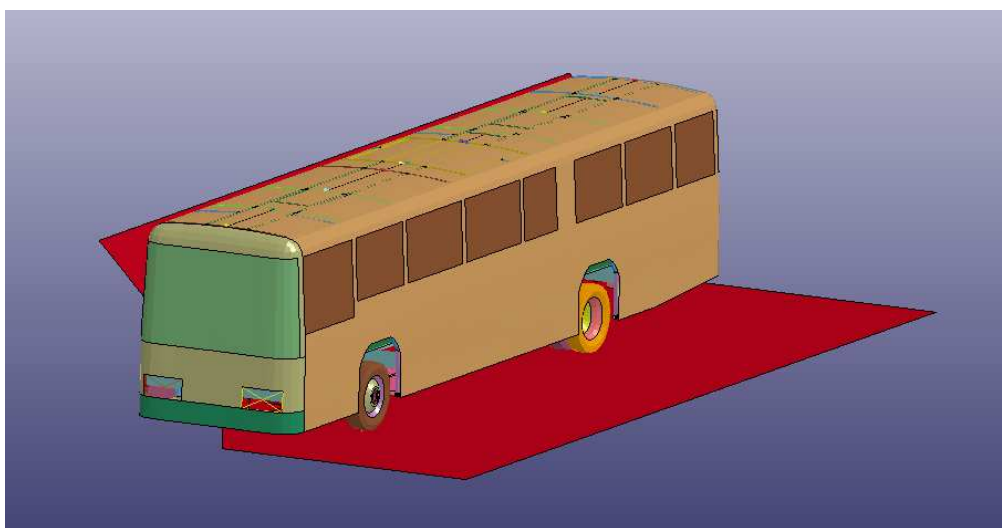


Figura 67: Autobús importado

Para poder situarlo en su posición se necesita realizar movimientos de traslación y rotación. Para ello, se selecciona la opción *Translt* dentro de la pestaña 2. Para realizar los movimientos solicitados, se utilizarán las opciones *Translate* y *Rotate* (Figura 68). En cada una de ellas, se especificará el eje de movimiento o rotación y el ángulo o distancia a mover. Para que la plataforma permanezca en el plano de origen, únicamente se moverá el autobús. Los movimientos se resumen en una rotación para orientar el autobús correctamente, una segunda rotación para adoptar la inclinación de la plataforma y una traslación en cada eje para ajustar la posición en la misma.

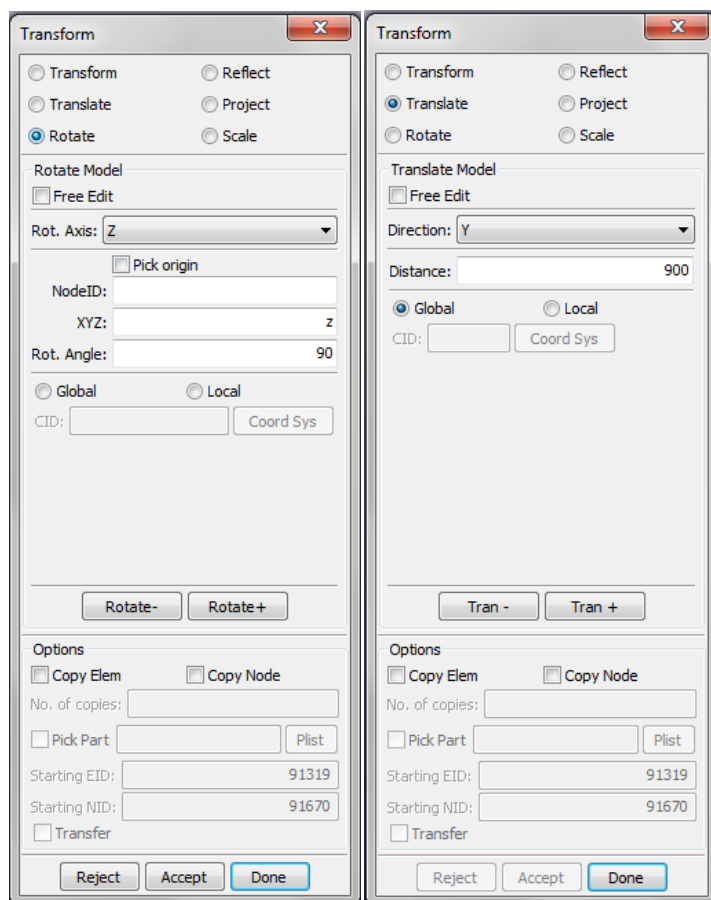


Figura 68: Menú de rotación y traslación

En la Figura 69 puede comprobarse como se encontraría el conjunto, a falta de asignar las condiciones finales de carga y contacto.



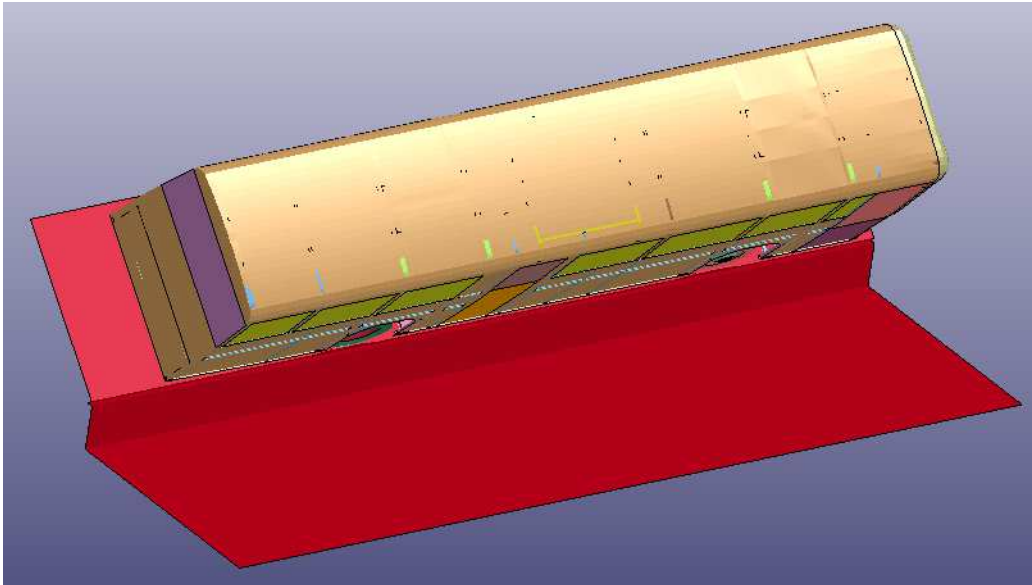
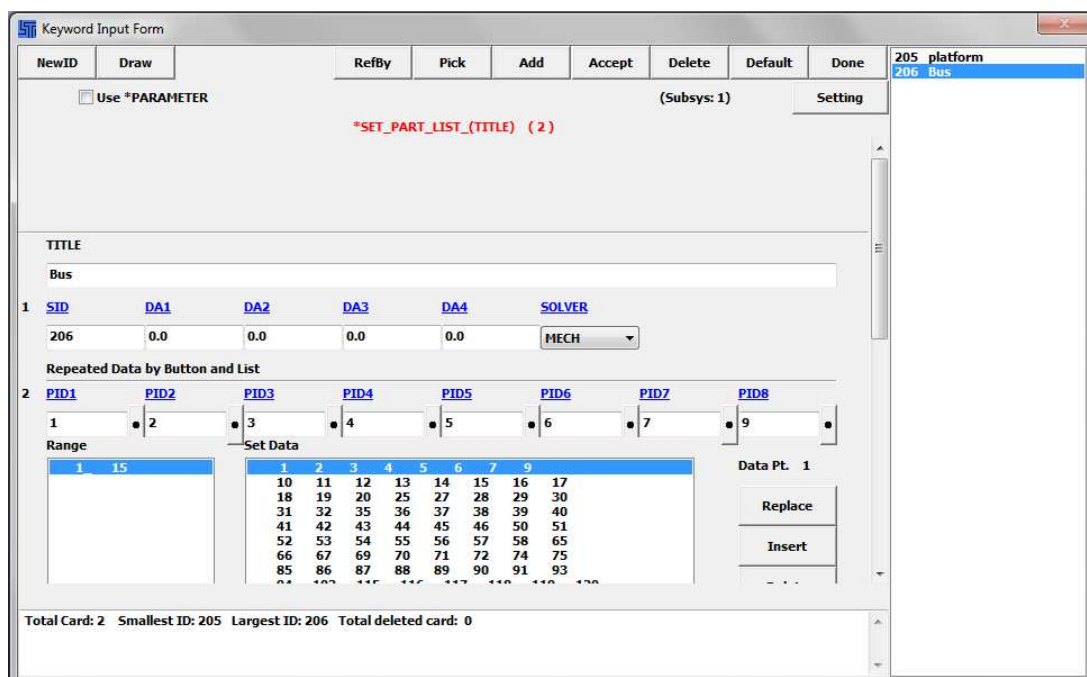


Figura 69: Autobús en posición inestable

Como ya se hizo con la plataforma, se debe crear un *SET\_PART\_LIST* con el autobús, que será referenciado al aplicar el contacto. Además, se debe tener en cuenta al seleccionar las piezas del *SET\_PART\_LIST*, que el espacio de seguridad no debe formar parte de dicho conjunto. En la Figura 70 se pueden apreciar los dos *SET* creados.



Keyword Input Form

NewID Draw RefBy Pick Add Accept Delete Default Done

☐ Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*SET\_PART\_LIST\_(TITLE) ( 2 )

TITLE  
Bus

1 SID DA1 DA2 DA3 DA4 SOLVER  
206 0.0 0.0 0.0 0.0 MECH

Repeated Data by Button and List

2 PID1 PID2 PID3 PID4 PID5 PID6 PID7 PID8  
1 2 3 4 5 6 7 9

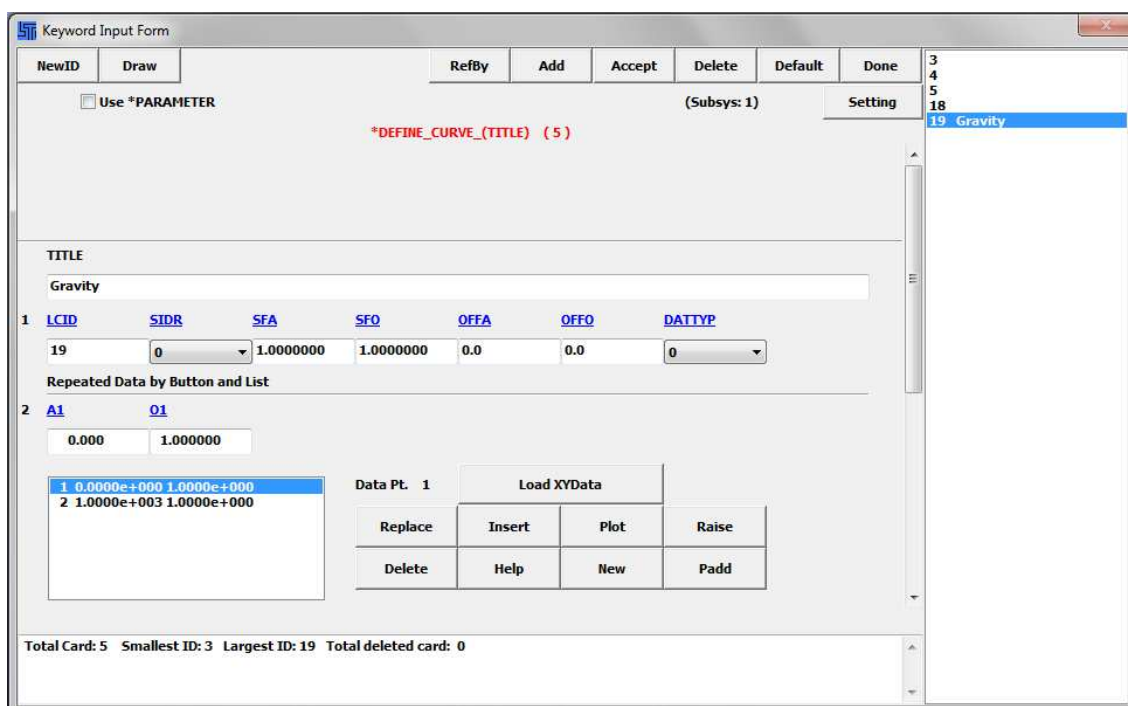
Range Set Data Data Pt. 1

| 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 9   |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  |
| 18  | 19  | 20  | 25  | 27  | 28  | 29  | 30  |
| 31  | 32  | 35  | 36  | 37  | 38  | 39  | 40  |
| 41  | 42  | 43  | 44  | 45  | 46  | 50  | 51  |
| 52  | 53  | 54  | 55  | 56  | 57  | 58  | 65  |
| 66  | 67  | 69  | 70  | 71  | 72  | 74  | 75  |
| 85  | 86  | 87  | 88  | 89  | 90  | 91  | 93  |
| 101 | 102 | 115 | 116 | 117 | 118 | 119 | 120 |

Total Card: 2 Smallest ID: 205 Largest ID: 206 Total deleted card: 0

Figura 70: Set de autobús y plataforma

Lo siguiente que debe asignarse es la carga de la gravedad. Para ello se debe definir primero una curva, la cual simula un vector que incluye los valores de la gravedad en cada instante de tiempo. Para definir dicha curva se debe seleccionar *Define* → *Curve*. En este caso, los valores a introducir en el eje de ordenadas serán los de la carga, los cuales tendrán el valor de 1, porque será el factor por el que se multiplicará el valor de la gravedad asignado en el comando de carga. En abscisas se introducen los valores del tiempo (Figura 71). Únicamente será necesario introducir dos valores de tiempo para definir correctamente la curva.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*DEFINE\_CURVE\_(TITLE) ( 5 )

TITLE

Gravity

| 1  | LCID | SIDR      | SFA       | SFO | OFFA | OFFO | DATTYP |
|----|------|-----------|-----------|-----|------|------|--------|
| 19 | 0    | 1.0000000 | 1.0000000 | 0.0 | 0.0  | 0    | 0      |

Repeated Data by Button and List

| 2     | A1       | O1 |
|-------|----------|----|
| 0.000 | 1.000000 |    |

Data Pt. 1 Load XYData

|   |              |              |
|---|--------------|--------------|
| 1 | 0.00000e+000 | 1.00000e+000 |
| 2 | 1.00000e+003 | 1.00000e+000 |

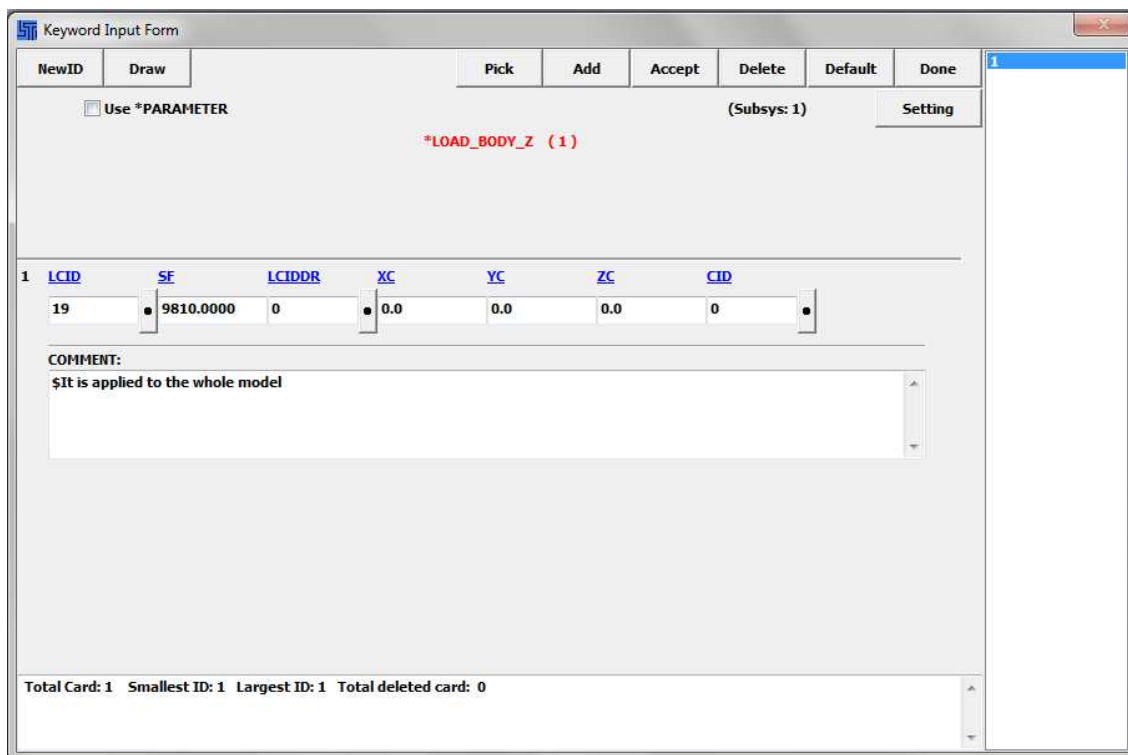
Replace Insert Plot Raise

Delete Help New Padd

Total Card: 5 Smallest ID: 3 Largest ID: 19 Total deleted card: 0

Figura 71: Menú de definición de curva

Con la curva de valores ya definida, se puede asignar la carga, entrando en *LOAD* y seleccionando *BODY\_Z*, ya que según la posición de los ejes de coordenadas del presente modelo, la gravedad coincidiría con el eje Z. En las casillas correspondientes se introduce el ID de la curva creada y el valor de la carga, que en este caso será de 9810 (Figura 72). Definiendo una carga de la forma descrita, se aplicará a todas las piezas involucradas en la simulación.



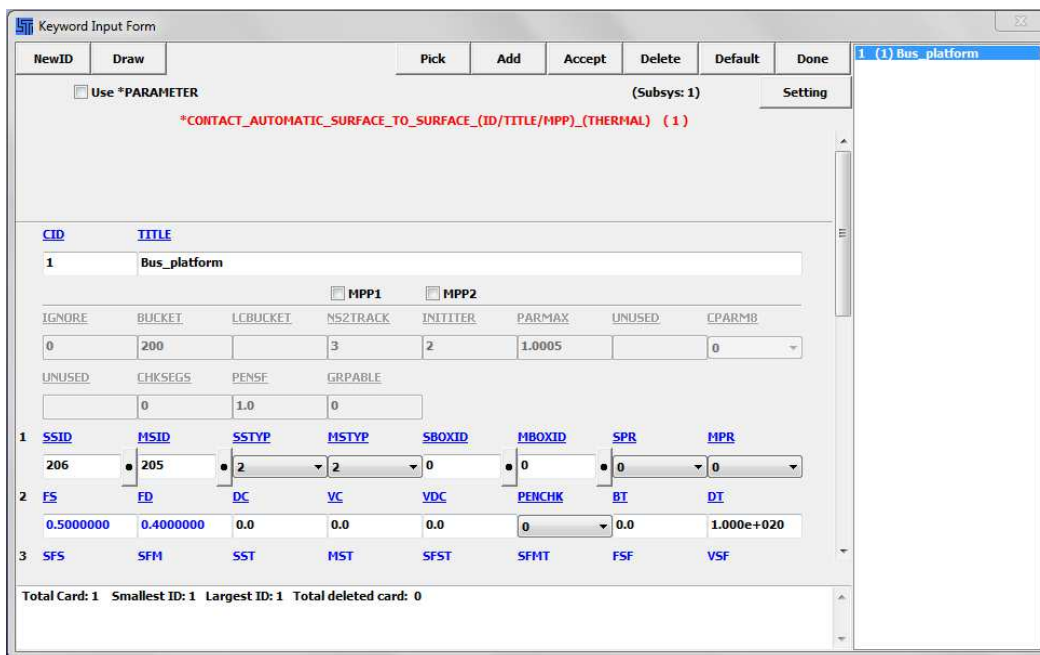
| 1 | LCID | SF        | LCIDDR | XC  | YC  | ZC  | CID |
|---|------|-----------|--------|-----|-----|-----|-----|
| 1 | 19   | 9810.0000 | 0      | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0   |

COMMENT:  
\$It is applied to the whole model

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Figura 72: Introducción parámetros de carga

Para terminar con la introducción de parámetros, se debe establecer el contacto entre la plataforma y el autobús. En este caso se debe emplear un contacto tipo *Surface to Surface*. Se necesita un *Set Part* de cada parte involucrada en el ensayo y definir cuál es la que recibe el golpe y cuál es la esclava o la que se va a deformar. Por tanto, la pieza esclava será el autobús y la *Master* la plataforma. Para introducir esto en LS-Prepost se debe seleccionar *CONTACT* y dentro, la opción *AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE*. Es muy importante introducir un valor de rozamiento tanto estático como dinámico entre los dos *SET* involucrados en el contacto, ya que en caso contrario el autobús deslizará sobre la plataforma y los resultados no serán fiables. En la Figura 73 se pueden observar las operaciones descritas en este párrafo.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

\*CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE (ID/TITLE/MPP) (THERMAL) (1)

| CID | TITLE        | MPP1 | MPP2 |
|-----|--------------|------|------|
| 1   | Bus_platform |      |      |

| IGNORE | BUCKET | LCBUCKET | NS2TRACK | INITITER | PARMAX | UNUSED | CPARMB |
|--------|--------|----------|----------|----------|--------|--------|--------|
| 0      | 200    |          | 3        | 2        | 1.0005 |        | 0      |

| UNUSED | CHKSEGS | PENSP | GRPABLE |
|--------|---------|-------|---------|
|        | 0       | 1.0   | 0       |

| 1 | SSID | MSID | SSTYP | MSTYP | SBOXID | MBOXID | SPR | MPR |
|---|------|------|-------|-------|--------|--------|-----|-----|
|   | 206  | 205  | 2     | 2     | 0      | 0      | 0   | 0   |

| 2 | FS        | FD        | DC  | VC  | VDC | PENCHK | BT  | DT         |
|---|-----------|-----------|-----|-----|-----|--------|-----|------------|
|   | 0.5000000 | 0.4000000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0      | 0.0 | 1.000e+020 |

| 3 | SFS | SFM | SST | MST | SFST | SFMT | FSF | VSF |
|---|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|
|   |     |     |     |     |      |      |     |     |

Total Card: 1 Smallest ID: 1 Largest ID: 1 Total deleted card: 0

Figura 73: Parámetros de contacto

Únicamente queda por asignar el mallado del autobús, que se realizará con el comando *Surmesh*, como ya se hizo con el espacio de supervivencia y con la plataforma. De esta forma se busca un compromiso entre fiabilidad de resultados y tiempo de simulación, porque cuanto más fina sea la malla y mayor el número de elementos, mayor será también el tiempo de simulación invertido. Se ha seleccionado que los elementos que predominen sean cuadrados y tratar de evitar concentraciones de nodos en puntos críticos que hagan que la simulación tarde más tiempo. En la Figura 74 se puede observar el autobús con el mallado aplicado.

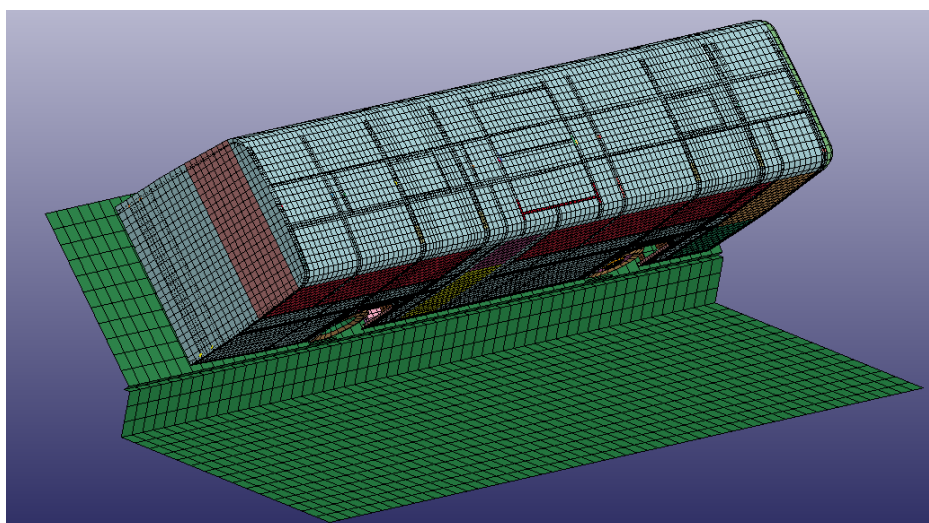
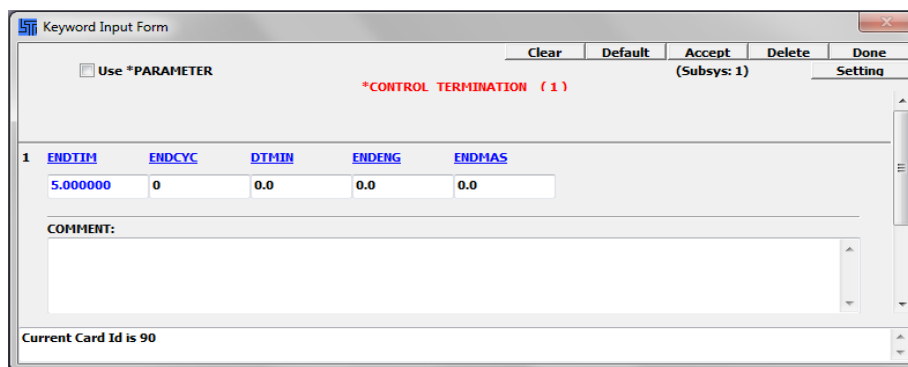


Figura 74: Autobús con el mallado aplicado

De esta forma, el modelo se resume en 54738 elementos, 56322 nodos y 120 piezas.

#### 4.1.5 Configuración de los datos de salida

Antes de realizar la simulación, se deben asignar las condiciones de salida y el intervalo de tiempo que se desea. Para establecer el tiempo de simulación, se debe abrir la pestaña *CONTROL* y seleccionar la opción *TERMINATION*. Dentro de la opción mencionada se deberá indicar en el parámetro *END TIME* el tiempo que durará el ensayo y tras el cual se parará la simulación. Como se indicó al inicio, el tiempo se establece en segundos (Figura 75).



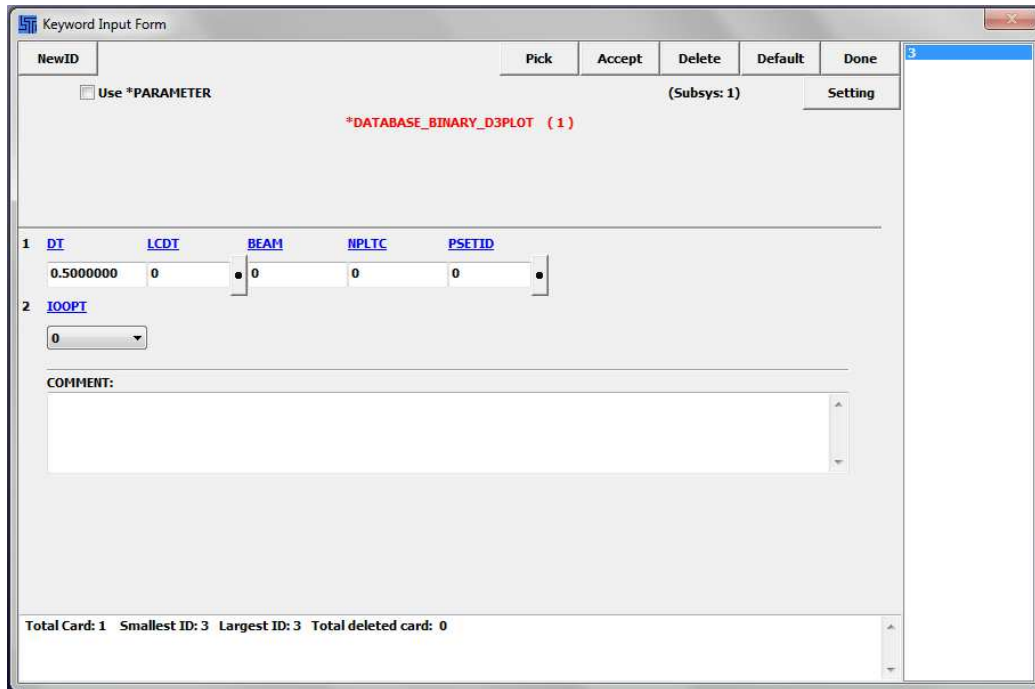
|   | ENDTIM   | ENDCYC | DTMIN | ENDENG | ENDMAS |
|---|----------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 5.000000 | 0      | 0.0   | 0.0    | 0.0    |

COMMENT:

Current Card Id is 90

Figura 75: Pantalla de duración de la simulación

Los datos de salida se seleccionan en la opción *DATABASE*. Aunque no es necesario introducir datos en esta pestaña para realizar la simulación, si lo será si se quieren obtener archivos de salida con información de los resultados. Cuantas más opciones de salida se asignen, más tiempo durará el proceso de resolución, por tanto, inicialmente se seleccionarán las opciones referentes a geometría deformada y elementos discretos (Figuras 76 y 77). En la opción DT se introduce el intervalo de tiempo entre salidas de datos. De momento será suficiente seleccionando 0.5 segundos entre salidas.



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Setting

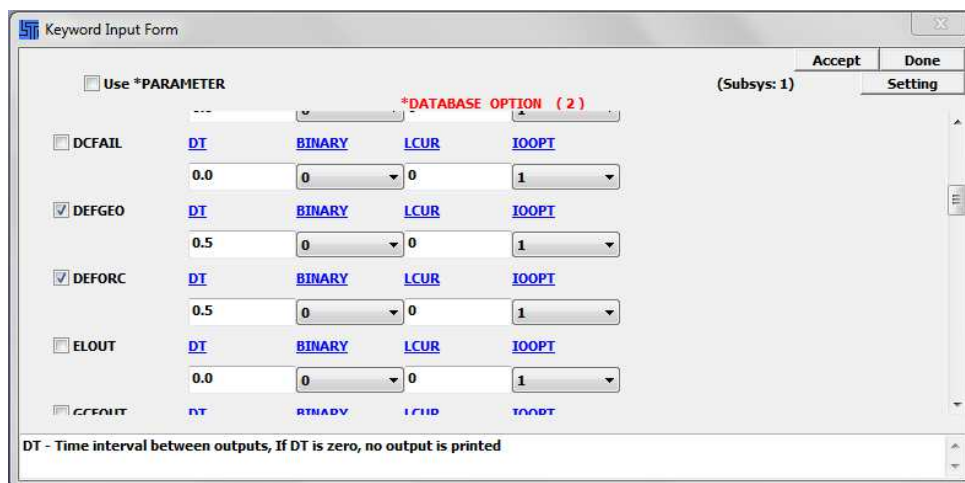
**\*DATABASE\_BINARY\_D3PLOT (1)**

| ID | DT        | LCDT | BEAM | NPLTC | PSETID | IOOPT |
|----|-----------|------|------|-------|--------|-------|
| 1  | 0.5000000 | 0    | 0    | 0     | 0      | 0     |
| 2  | IOOPT: 0  |      |      |       |        |       |

COMMENT:

Total Card: 1 Smallest ID: 3 Largest ID: 3 Total deleted card: 0

Figura 76: Configuración de datos de salida



Keyword Input Form

Use \*PARAMETER (Subsys: 1) Accept Done Setting

**\*DATABASE\_OPTION (2)**

| Option                                     | DT  | BINARY | LCUR | IOOPT |
|--|-----|--------|------|-------|
| <input type="checkbox"/> DCFAIL            | 0.0 | 0      | 0    | 1     |
| <input checked="" type="checkbox"/> DEFGEO | 0.5 | 0      | 0    | 1     |
| <input checked="" type="checkbox"/> DEFORC | 0.5 | 0      | 0    | 1     |
| <input type="checkbox"/> ELOUT             | 0.0 | 0      | 0    | 1     |
| <input type="checkbox"/> CCFOUT            | DT  | BINARY | LCUR | IOOPT |

DT - Time interval between outputs, If DT is zero, no output is printed

Figura 77: Configuración de datos de salida

## 4.2 Simulación

Para dar comienzo a la resolución del problema se debe abrir LS-Dyna a través del lanzador de producto de Ansys. En la pantalla que aparece se seleccionará LS-Dyna como entorno de trabajo, así como el directorio donde se irán almacenando los

datos de salida y la carpeta en la que se encuentra el archivo con la información para realizar la simulación (Figura 78).

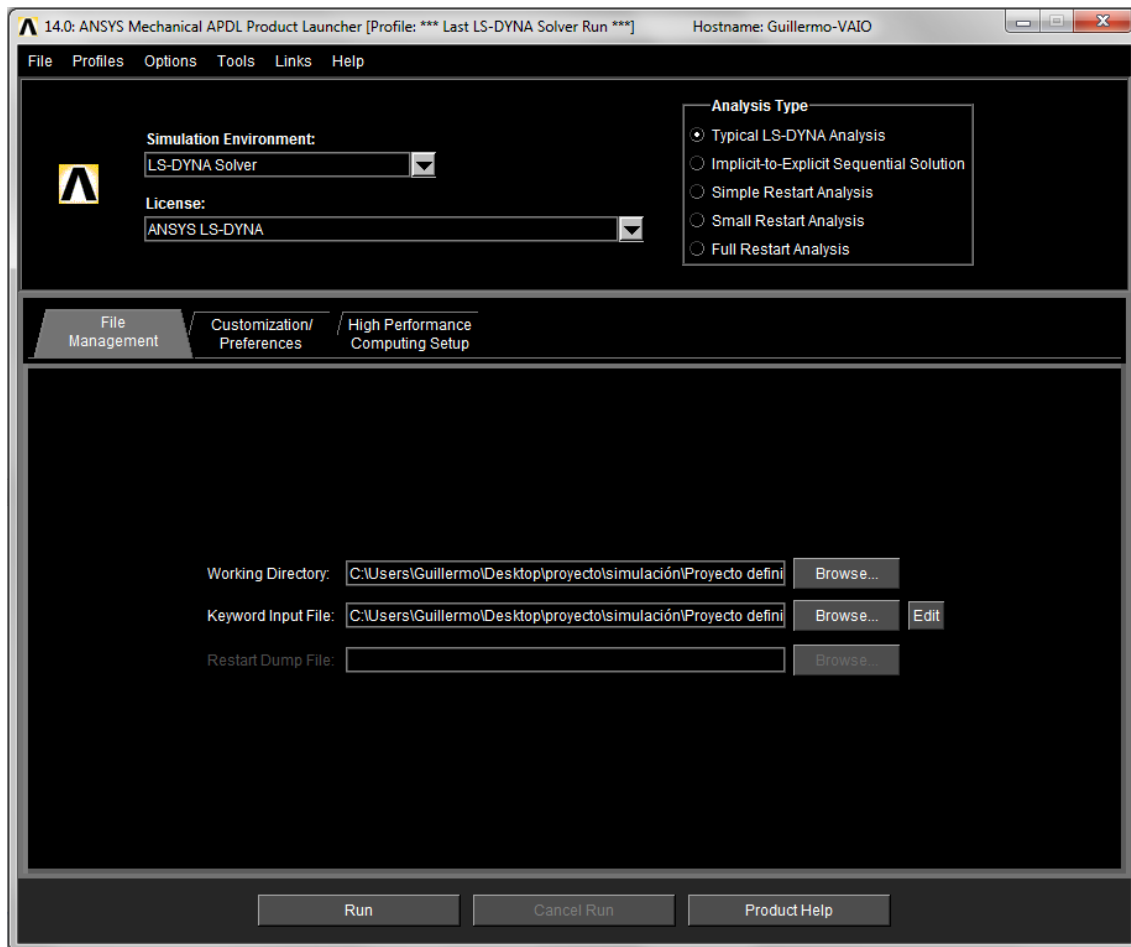


Figura 78: Lanzador de LS-Dyna

Como se podía apreciar en la Figura 75, el tiempo de simulación se establece en 5 segundos, obteniendo datos de salida para las gráficas cada medio segundo. Con estas condiciones, el tiempo de simulación se estima en 1005 horas, como se puede comprobar en la Figura 79. Este tiempo es inviable, ya que serán necesarias varias simulaciones y como es lógico, no es posible tener tanto tiempo el ordenador ocupado ni esperar tanto para obtener resultados.

```
estimated total cpu time      = 3081931 sec < 856 hrs 5 mins>
estimated cpu time to complete = 3081923 sec < 856 hrs 5 mins>
estimated total clock time    = 3618184 sec < 1005 hrs 3 mins>
estimated clock time to complete = 3618177 sec < 1005 hrs 2 mins>
```

Figura 79: Tiempo estimado de simulación



### 4.3 Reducción del modelo

Como se ha podido comprobar, para que el modelo resulte viable y eficiente se debe simplificar para poder obtener datos de salida en tiempos más ajustados. Para ello, haciendo referencia a estudios anteriores como los de [9, 10] en los que únicamente se ensaya una sección de la estructura, se decide reducir el modelo a la estructura del autobús con el bastidor. Al eliminar el resto de piezas, se debe revisar todo el modelo, ya que hay que eliminar todas las restricciones, conjuntos de nodos, piezas, contactos, etc, para que no haya conflictos a la hora de la extracción de resultados.

Por otra parte, esta reducción implica el cálculo del nuevo CDG y ángulo de vuelco. Además, se deberá adecuar la plataforma al nuevo ángulo y altura. En la Figura 80 puede observarse la vista tridimensional de la estructura tras la eliminación del resto de piezas.

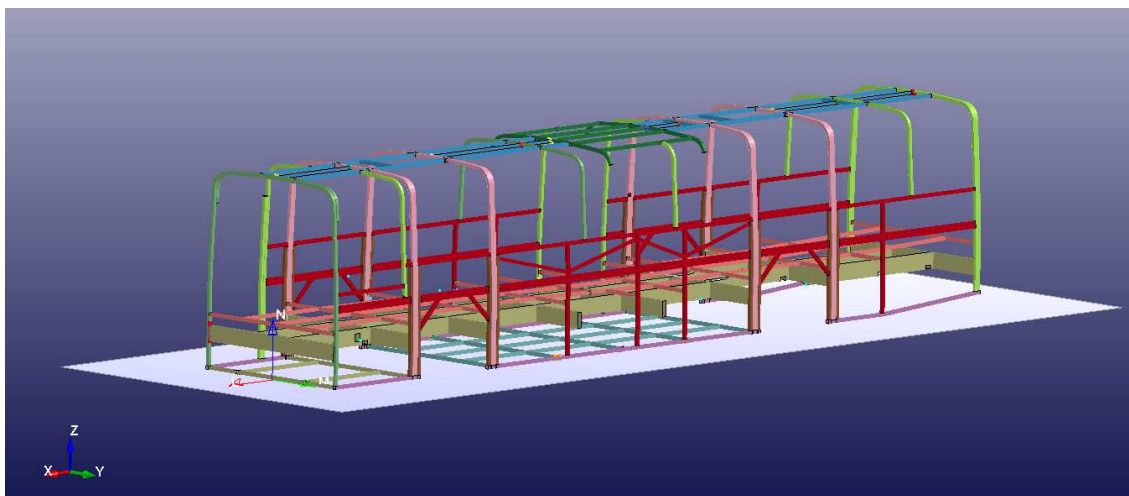


Figura 80: Estructura resultante para la simulación

Para la obtención del centro de gravedad y del nuevo ángulo de vuelco, se debe seguir el mismo procedimiento que ya se explicó en el Capítulo III para el autobús entero. Los datos obtenidos son los siguientes:

$$X_G = -5879.02 \text{ mm}$$

$$Y_G = -31.4178 \text{ mm}$$

$$Z_G = 989.051 \text{ mm}$$



Masa = 3.216 toneladas

El nuevo ángulo al que se produce el vuelco de la estructura es de  $48,31^\circ$  y deberá reflejarse en la plataforma, ya que la simulación debe iniciarse desde el punto inestable con energía cinética nula, como ya se ha comentado con anterioridad. Además, los soportes que antes ejercían de freno sobre las ruedas y que permitían el vuelco de la estructura en lugar del deslizamiento, deben adecuarse al tamaño de la estructura inferior. Esto es debido a que si se mantienen los anteriores, no se producirá la caída debido a su gran tamaño comparado con las barras. Aplicando las nuevas condiciones descritas y volviendo a posicionar el autobús en la situación inicial, el modelo quedará como puede observarse en la Figura 81.

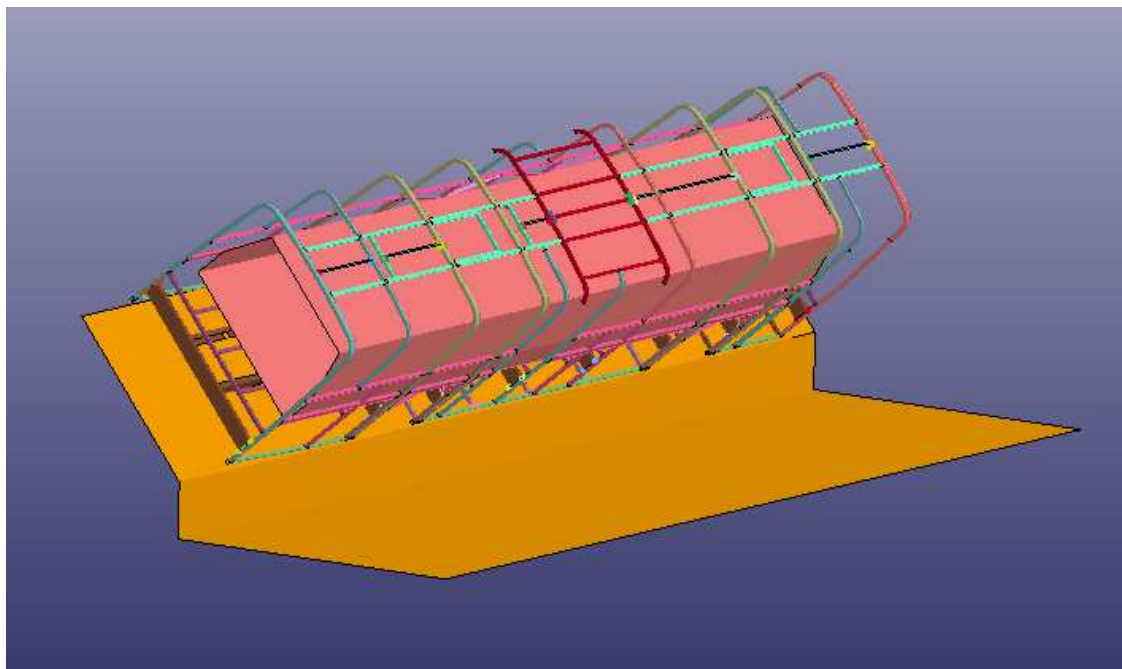


Figura 81: Modelo en posición inicial

Para terminar de adaptar el modelo, se deben volver a crear los nuevos *SET\_PART* y ser llamados desde la condición de contacto. Como al inicio, un *SET\_PART* será la plataforma y el otro la estructura, sin tener en cuenta el espacio de seguridad. Se mantendrá el mismo mallado que ya tenía la estructura antes de reducir el modelo.

La selección de datos de salida será de 4.5 segundos y para obtener datos más representativos, se empleará 0.1 segundos como intervalo de tiempo entre salidas. Finalmente, tras realizar los cambios realizados, se obtiene que el tiempo de

simulación total es de casi 23 horas (Figura 82), por lo tanto, la reducción es considerable y los resultados serán igualmente representativos.

```
estimated total cpu time      =      3 sec <      0 hrs  0 mins>
estimated cpu time to complete =      0 sec <      0 hrs  0 mins>
estimated total clock time    = 82665 sec <    22 hrs 57 mins>
estimated clock time to complete = 82662 sec <    22 hrs 57 mins>
```

Figura 82: Tiempo total de simulación tras las modificaciones

## 4.4 Diagrama de bloques de procedimiento

En la Figura 83 se resumen los pasos seguidos durante la introducción de parámetros en LS-Prepost.

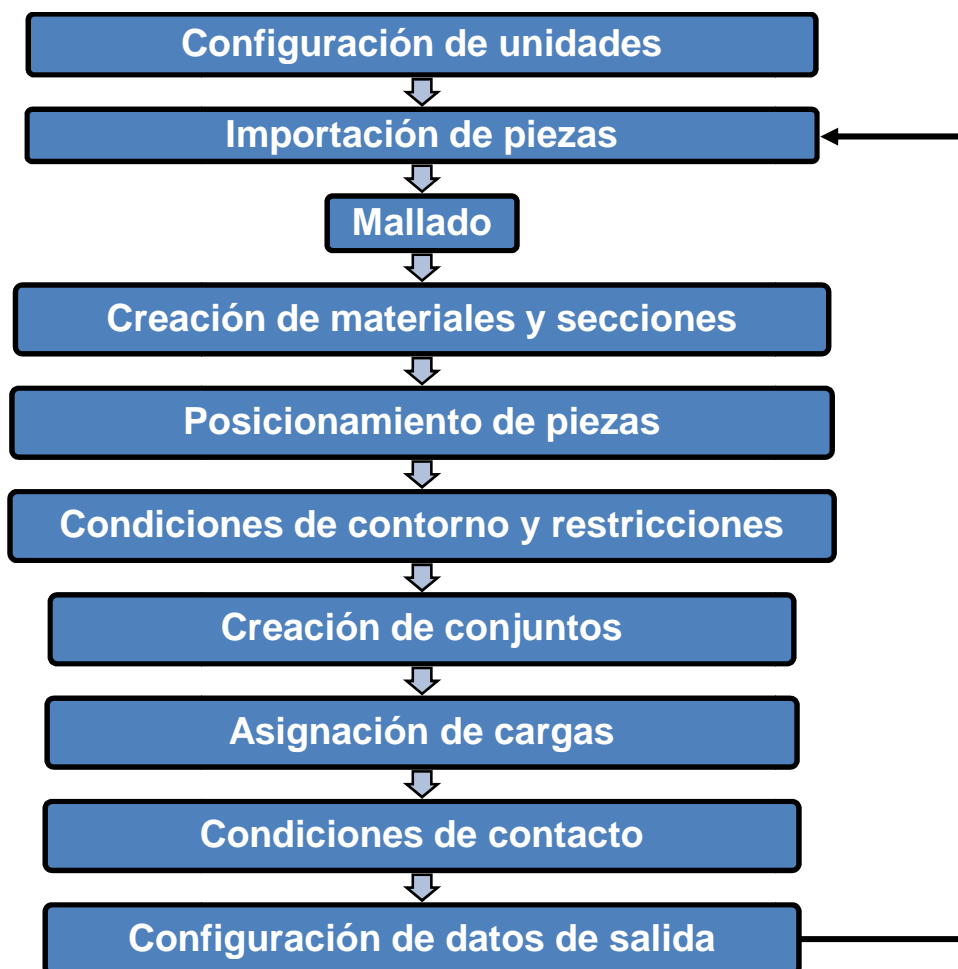


Figura 83: Diagrama de bloques para la configuración de LS-Prepost

## Capítulo V: Resultados

En el presente capítulo se realizará un análisis de los resultados, extrayendo diversas gráficas características y comprobando, gracias a la animación obtenida, si se produce algún tipo de intrusión por parte de la estructura en el espacio de seguridad.

Para poder tener acceso tanto a las animaciones, como a las gráficas, se carga el archivo *D3Plot* en LS-Prepost. Para ello, se debe abrir el archivo original simulado y seleccionar *Open* → *LS-Dyna Binary Plot*. Desde ese momento, se podrá realizar la animación del ensayo, así como tener la posibilidad de extraer gráficas de tensión, velocidad, aceleración o desplazamiento, en función del tiempo para varios nodos, piezas o elementos.

### 5.1 Análisis del espacio de seguridad

Lo que dictamina el Reglamento R66 [6] en relación a si una estructura es apta o no es lo siguiente:

- Ninguna parte del vehículo que se encuentre fuera del espacio de supervivencia al inicio del ensayo (por ejemplo, montantes, anillas de seguridad o rejillas portaequipajes) invadirá el espacio de supervivencia durante el ensayo; a la hora de evaluar la invasión del espacio de supervivencia se ignorarán todas las partes estructurales que originalmente se encuentren en dicho espacio (por ejemplo, barras de sujeción verticales, tabiques, cocinas o aseos).

- Ninguna parte del espacio de supervivencia deberá sobresalir del contorno de la estructura deformada; el contorno de la estructura deformada se determinará secuencialmente, entre cada montante de ventana o puerta adyacente; el contorno entre dos montantes deformados será una superficie teórica, determinada por líneas rectas, que conecte los puntos del contorno interior de los montantes que se encontraban a la misma altura sobre el nivel del piso antes del ensayo de vuelco.

El resultado deseable sería que la estructura no se deformara de forma excesiva tras la caída, así como que no penetre en el espacio de seguridad. Ahora se

procede a comprobarlo de forma visual a través de la secuencia de vuelco reflejada en las Figuras 84, 85, 86 y 87.

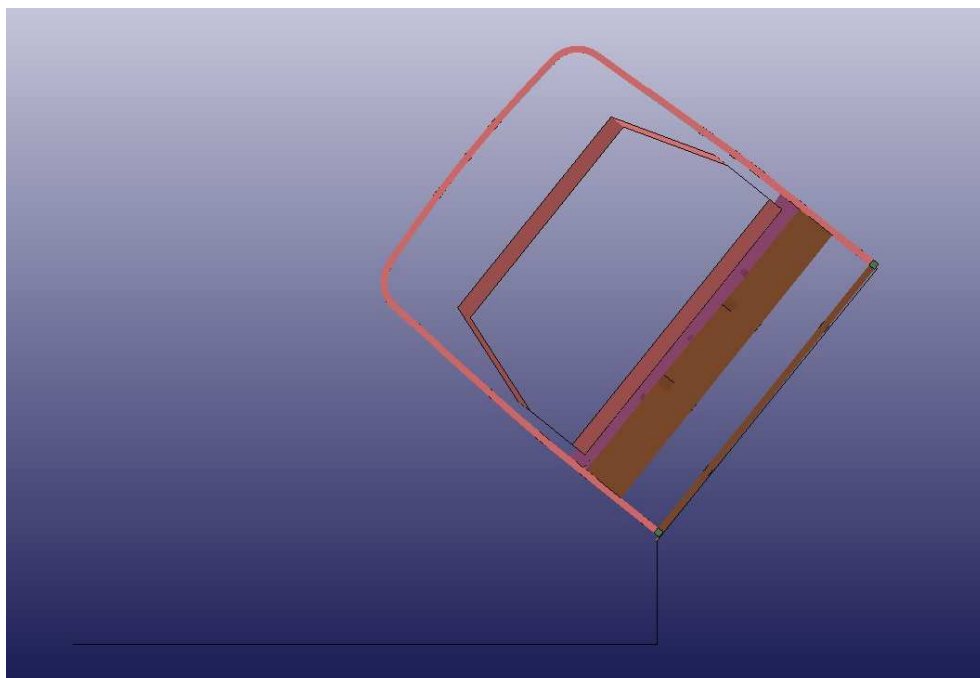


Figura 84: Posición inicial del vuelco ( $t=0$ )

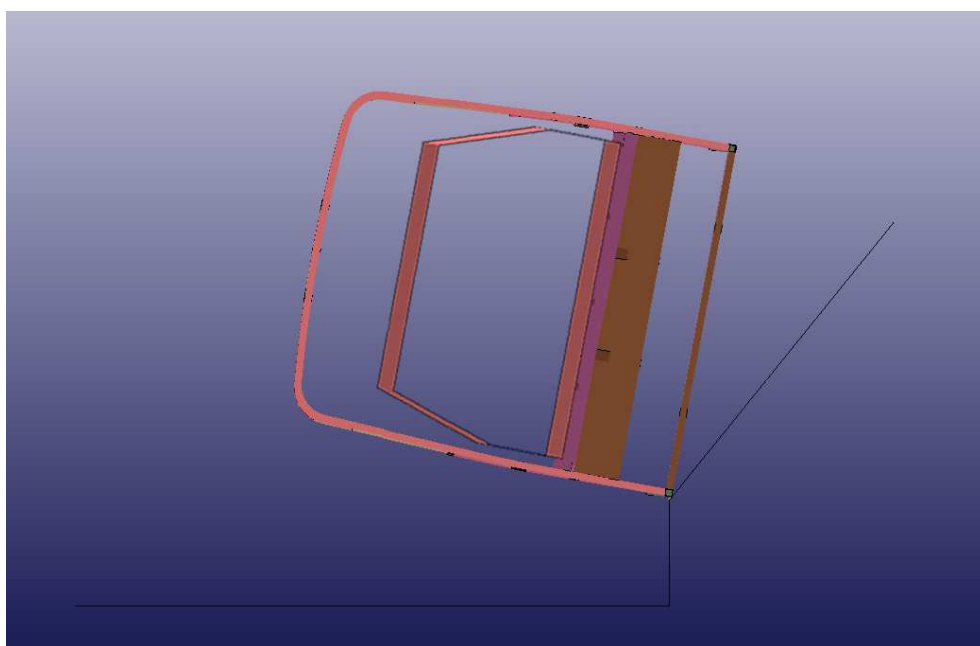


Figura 85: Posición intermedia del proceso de vuelco ( $t=2.3$ )

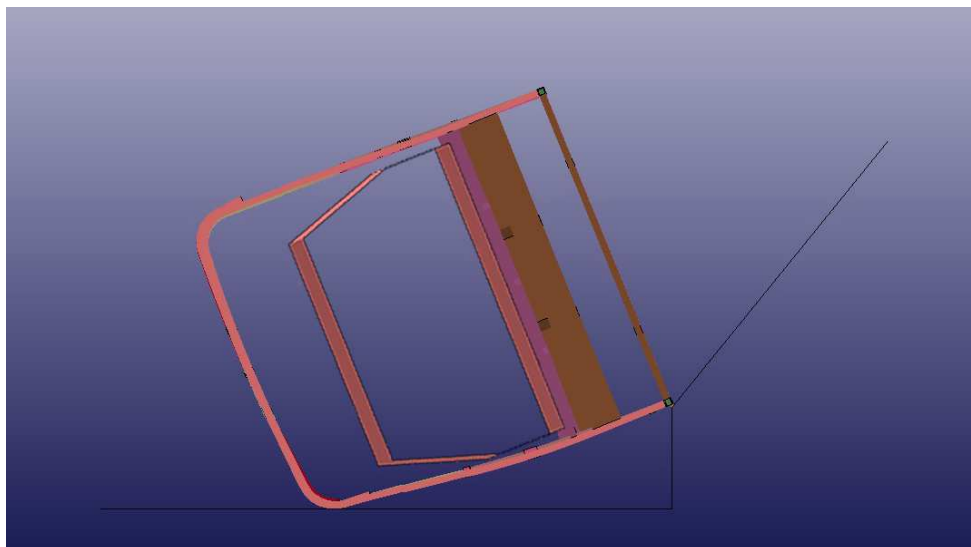


Figura 86: Posición de la estructura en el momento del impacto ( $t=2.6$ )

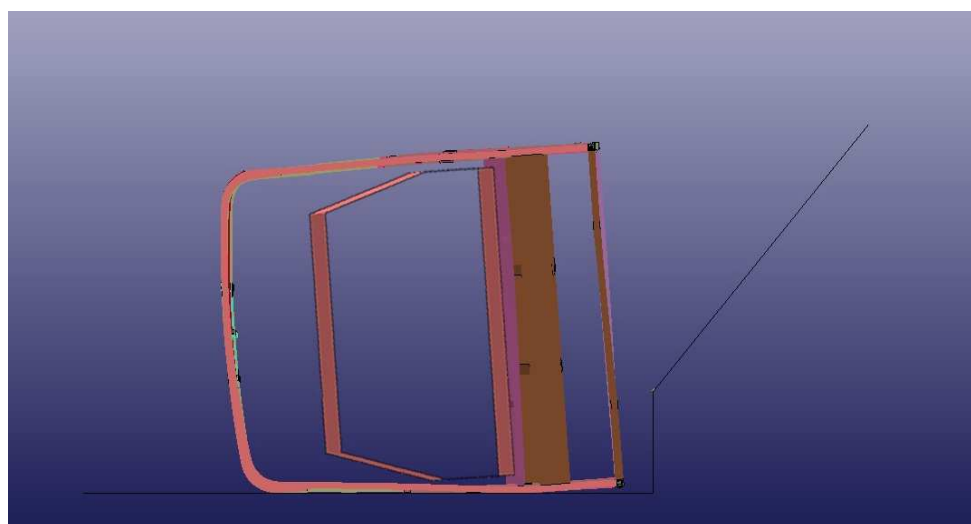


Figura 87: Posición final de la estructura tras el ensayo ( $t=4.3$ )

Como se aprecia en la secuencia de Figuras 84-87, la estructura rota inicialmente en torno al eje X por la acción de retención del soporte de la plataforma, hasta que en el instante  $t = 2.6$  segundos se produce el impacto contra el suelo. Centrando la atención en las Figuras 86 y 87, se puede apreciar la deformación permanente de la estructura, ocasionada por la caída libre desde la plataforma.

## 5.2 Análisis de la energía

Por otra parte, el Reglamento R66 establece que la energía que ha de absorber la estructura se recoge en la ecuación 6, como ya se comentó en la descripción de los tipos de ensayo. Una vez realizada la simulación, se puede realizar este cálculo, ya que LS-Prepost permite obtener la posición del centro de gravedad real en el momento del impacto.

- Altura del centro de gravedad en la posición inestable:  $Z_G = 2354.35$  mm
- Altura del centro de gravedad en el momento del impacto:  $Z_G = 1535.91$  mm

Sabiendo que la masa es de 3.21 toneladas y que el valor de la gravedad es  $9819 \text{ mm/s}^2$ , se puede obtener la energía que debe absorber la estructura:

$$E_{\text{abs}} = 0.75 \cdot M \cdot g \cdot (h_2 - h_3) = 0.75 \cdot 3.21 \cdot 9810 \cdot (2354.35 - 1535.91) = 19329568.08 \text{ KJ}$$

Simplificando el dato, se puede afirmar que la energía que debe absorber la estructura es de 19.33 GJ. Si se representa la energía cinética durante el proceso de vuelco (Figura 88), se comprueba que su valor es bastante aproximado al calculado antes.

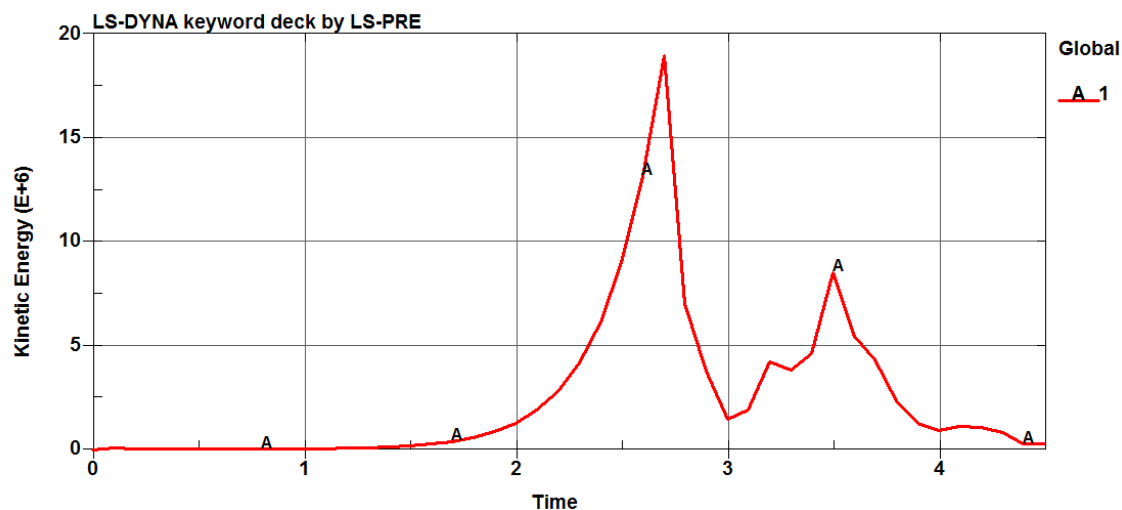


Figura 88: Variación de energía cinética

De esta gráfica se puede deducir que el valor máximo de energía cinética se registra a los 2,6 segundos de empezar el ensayo, instante que coincide con el

intervalo de tiempo justo antes de golpear el suelo. En dicho instante, la energía cinética alcanza un valor de 19 GJ. Se registra otro pico de energía en el instante posterior al impacto, correspondiendo con el momento en que la estructura cae por completo al suelo de la plataforma. Un dato que refleja la gráfica es que la energía cinética inicial es 0, tal y como manda el Reglamento R66, valor que volverá a alcanzar cuando la estructura se estabilice en el suelo tras el impacto.

### 5.3 Análisis de la velocidad y aceleración

Así mismo, gracias a LS-Prepost se pueden obtener gráficas de resultados de cualquier parámetro, como por ejemplo, la variación de la velocidad y la aceleración de la estructura completa, medidas en el eje Z, es decir, el eje en el que se produce la caída. Estos datos se reflejan en las Figuras 89 y 90.

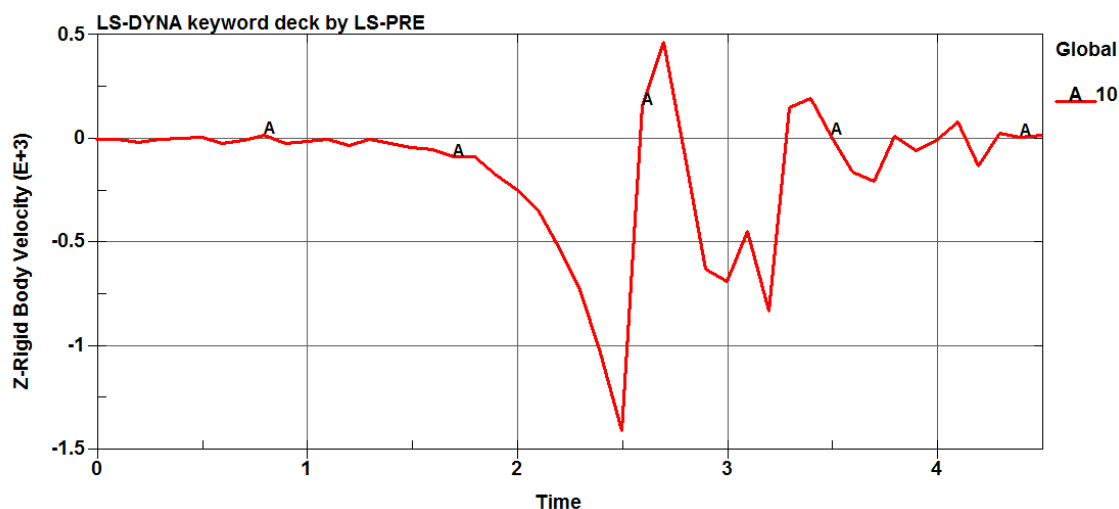


Figura 89: Variación de la velocidad de caída de la estructura

Como se puede observar, la gráfica no refleja apenas velocidad lineal en los dos primeros segundos, debido a que se ha representado la componente del eje vertical y durante este tiempo inicial, el autobús únicamente está rotando. Tras esta rotación, comienza a adquirir velocidad lineal, hasta que pasados 2.5 segundos, con una velocidad de 1.4 m/s, impacta contra el suelo de la plataforma produciéndose la deformación de la misma y con ello una reducción brusca de la velocidad. También se

puede ver cómo tras el impacto, la velocidad cambia de signo hasta llegar a 0.4 m/s debido a la recuperación elástica de los materiales de la estructura tras el golpe. Finalmente, tras una serie de movimientos en el suelo, termina por estabilizarse y pararse.

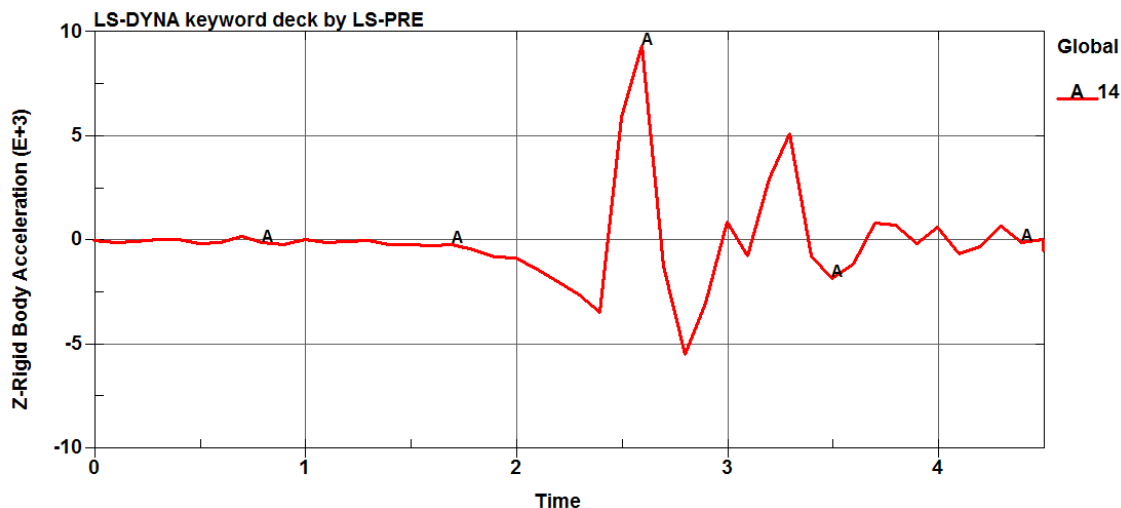


Figura 90: Variación de la aceleración en la caída de la estructura

En cuanto a los valores de la aceleración de la estructura, lo más reseñable sería observar cómo crece la aceleración poco a poco hasta que se produce un pico de desaceleración en el momento del impacto ( $t = 2.6$  segs). Para poder terminar de analizar el vuelco, se extrae también la gráfica del desplazamiento de la estructura en el eje Z (Figura 91).

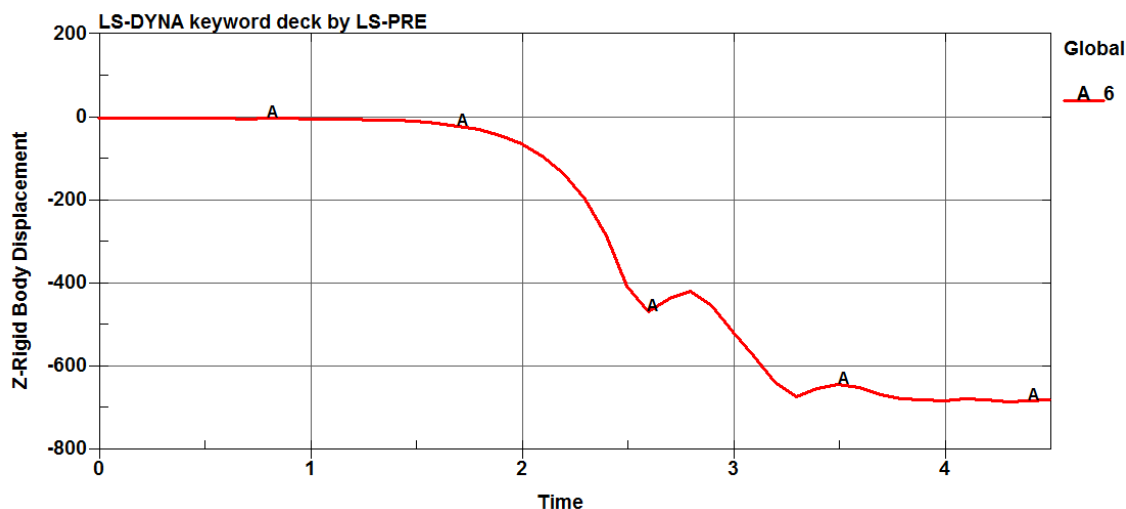


Figura 91: Desplazamiento de la estructura en el eje Z



En la Figura 91 se puede comprobar cómo hasta los 1.5 segundos, la estructura está pivotando en torno al soporte de la plataforma y a partir de ahí, comienza la caída libre hacia el suelo. A los 2.6 segundos, momento en que se produce el impacto, se observa que la estructura no ha alcanzado el punto más bajo en cuanto al desplazamiento. Esto es a causa de que el impacto se produce en posición invertida y de lado. En el instante que se estabiliza el autobús en el suelo, puede comprobarse como ha descendido los 710 mm de altura.

## 5.4 Análisis de nodos representativos de la estructura

A continuación, se ha decidido seleccionar una serie de nodos para realizar comparaciones entre ellos. Estos nodos son los que se detallan en las Figura 92 y 93. Los números de identificación de los mismos son: 43207, 42734, 41265, 40759, 39322, 38775 y 19874. Los cuatro primeros nodos corresponden a la parte superior de la estructura y los tres últimos a la parte inferior.

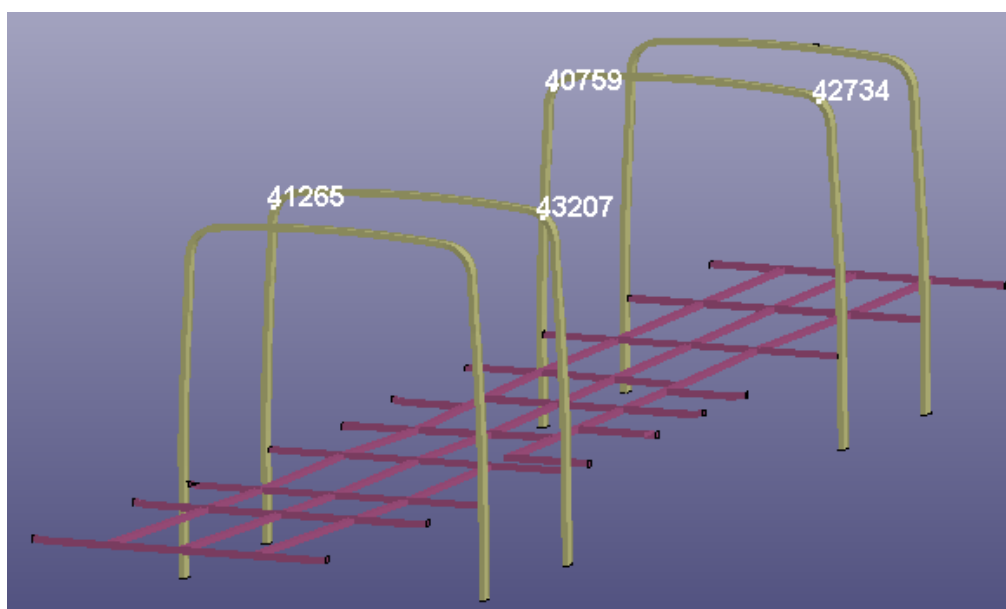


Figura 92: Nodos a estudiar de la parte superior de la estructura

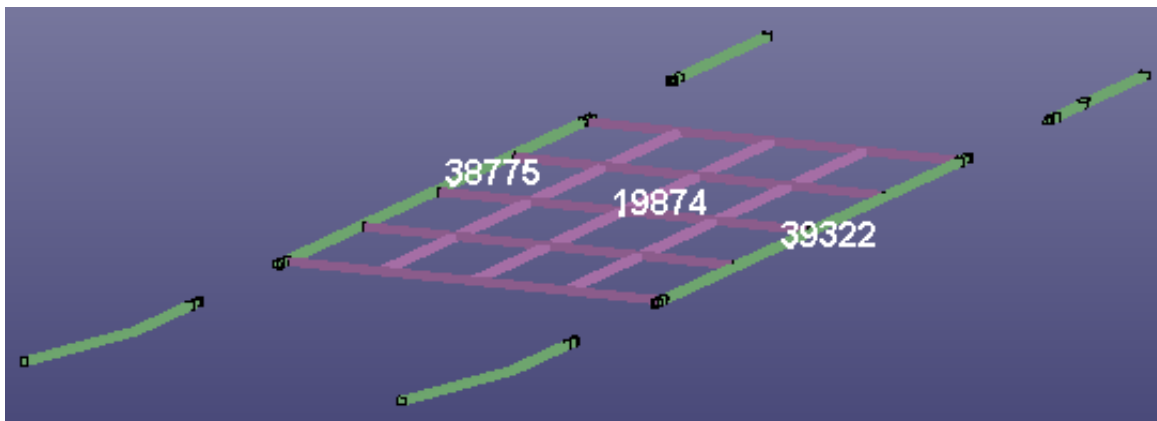


Figura 93: Nodos a estudiar en la parte inferior de la estructura

De ahora en adelante, las gráficas de resultados se obtendrán para comparar los siete puntos descritos. En LS-Prepost únicamente se deben seleccionar una vez y ya se mantendrán activos para representar cualquier magnitud relativa a ellos.

### 5.4.1 Análisis de desplazamientos

En las Figuras 94, 95 y 96 están reflejados los desplazamientos de los nodos seleccionados en cada uno de los ejes.

- En la Figura 94 se puede observar el desplazamiento en el eje X, el cual corresponde con el eje longitudinal del autobús y en torno al que se realiza la rotación para el vuelco. Como se puede esperar, ya que sólo debe haber rotación hasta que cae la estructura, el desplazamiento en este eje debería ser nulo o mínimo. Efectivamente, el desplazamiento de los nodos como se puede comprobar es muy pequeño y se produce a partir del impacto, es decir, durante el proceso de detención del balanceo en el suelo y debido a que la estructura tiene una cierta inclinación. No obstante, el desplazamiento en este eje es del orden de 60 mm en sus puntos máximos y siempre tras el golpe.
- En la Figura 95, se puede comprobar cómo el orden de magnitud del desplazamiento es mayor que en la anterior, alcanzándose valores de 3 metros antes del impacto. Se trata del desplazamiento en dirección del eje transversal del vehículo (eje Y). Viendo el movimiento nodo a nodo, se

puede concluir que el nodo E coincide con el que se encuentra en el eje de rotación y por tanto permanece inmóvil durante el proceso de rotación de la estructura. Por otro lado, los puntos A y B, los cuales se mueven juntos, se refieren a los nodos seleccionados en la parte superior más cercana al eje de rotación, es decir, el lateral que golpea contra el suelo. Se puede apreciar visualmente la diferencia respecto a los otros dos nodos de la parte superior, C y D, en que estos últimos recorren mayor distancia por estar más alejados del punto de pivote o rotación. Por último, se observa que el desplazamiento de los puntos E, G y F se mantiene proporcional de forma visual debido a que los tres se sitúan en la parte inferior de la estructura, E en el eje de rotación, G en el centro y F en la parte más alejada del eje de rotación.

- En la Figura 96, se representa el desplazamiento en el tercer eje, coincidente con la altura, es decir, el eje vertical. Lo más reseñable de dicha Figura es observar como los puntos de la parte superior comienzan a descender, mientras que los de la parte inferior, a excepción del coincidente con el eje de rotación, ascienden por efecto del vuelco hasta que la estructura se queda posicionada en el suelo.

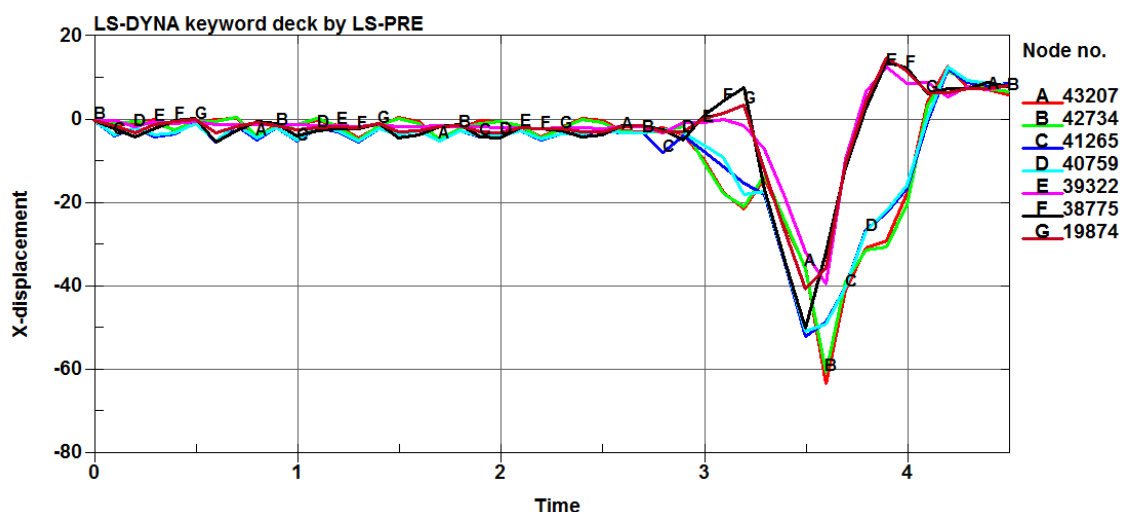


Figura 94: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje X

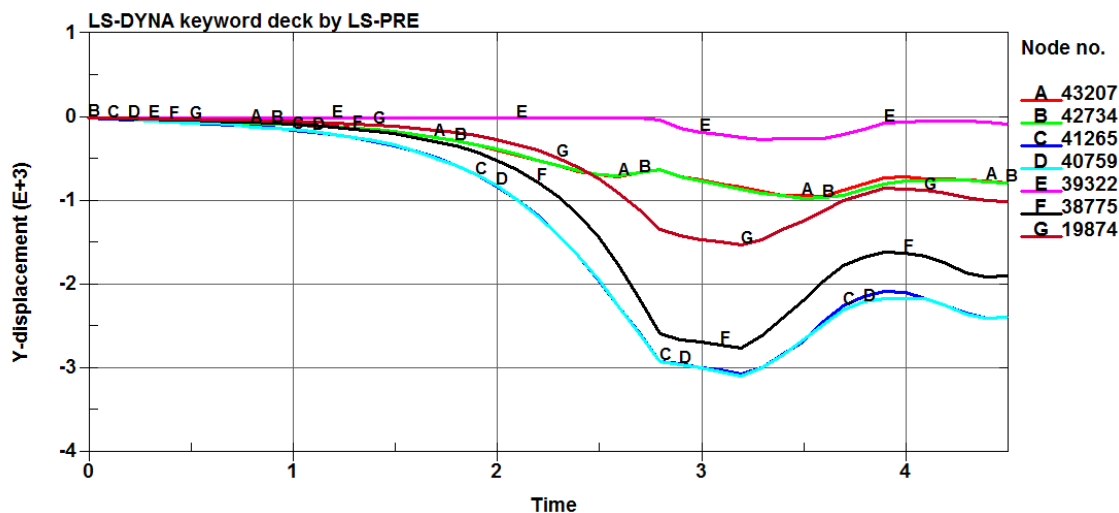


Figura 95: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje Y

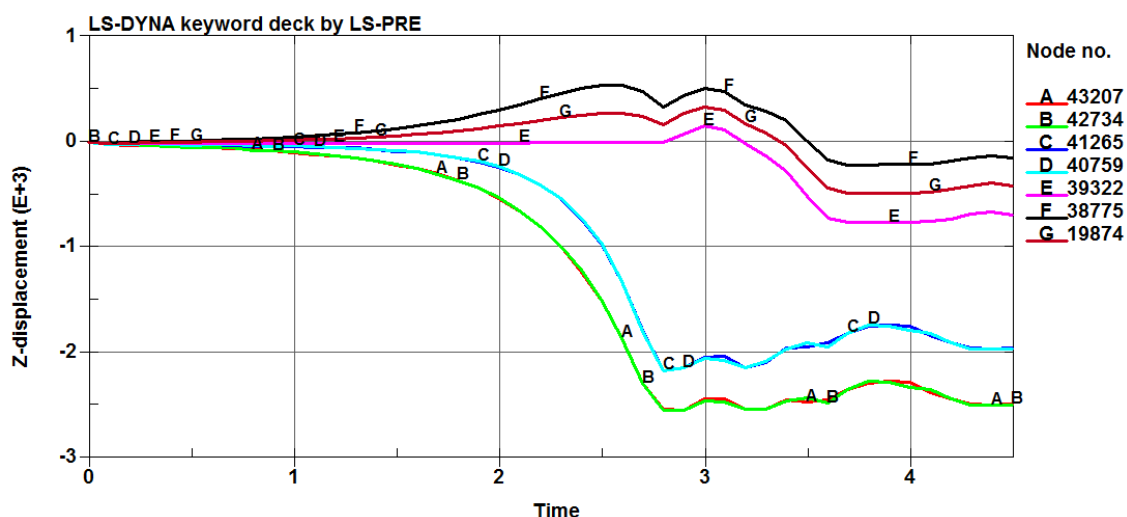


Figura 96: Desplazamiento de los nodos seleccionados en el eje Z

## 5.4.2 Análisis de la velocidad

En la Figura 97, se muestra la velocidad lineal de los siete nodos en el eje vertical. Esta gráfica refleja como en función de la posición, se registran diferentes velocidades de caída. Los puntos de la parte superior son los que registran la mayor velocidad, valor que se hace máximo justo antes del impacto. Si se retoma el valor máximo de la estructura obtenido en la Figura 89, el cual era de 1.4 m/s, se observa que el valor máximo de velocidad en los nodos seleccionados es de 6 m/s, casi cuatro

veces mayor. Por otra parte, como se observaba en la Figura 96, mientras que los puntos de la parte superior toman valores de velocidad en dirección negativa del eje Z, los de la parte inferior lo hacen en la dirección positiva hasta que termina la rotación y comienza la caída.

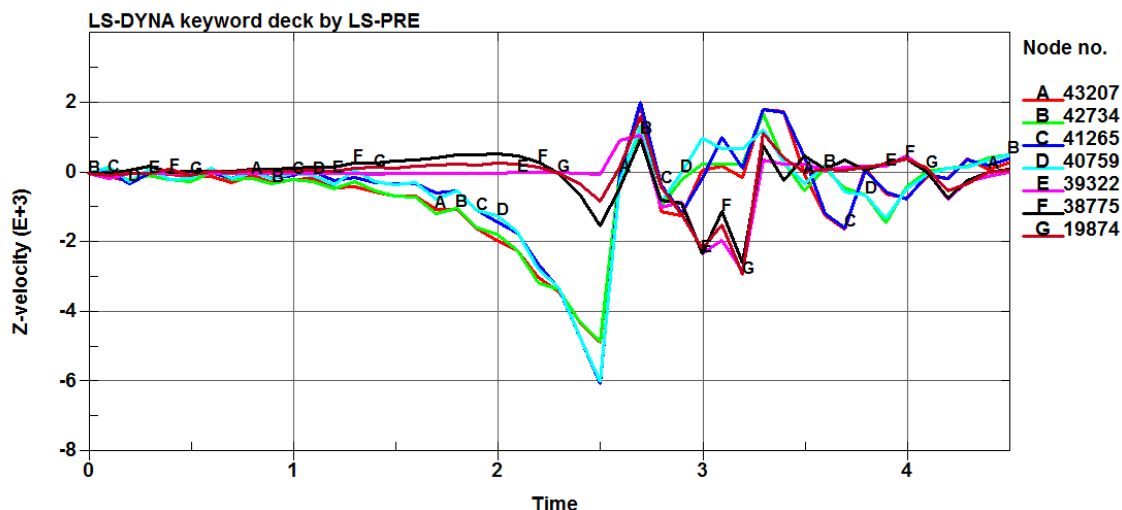


Figura 97: Variación de la velocidad lineal en el eje Z de los nodos seleccionados

## 5.5 Análisis de elementos representativos de la estructura

A continuación, se va a estudiar la tensión, deformación y esfuerzos de los elementos descritos en la Figura 98. Se trata de ocho elementos tipo *Shell* de los cuales, cuatro son de la parte superior de la estructura, dos de ellos del lado que impacta contra el suelo y otros dos del lado opuesto. Los otros cuatro elementos pertenecen a la parte de unión entre la estructura del suelo y los arcos principales, dos de cada lateral del autobús. Sus números de identificación son S24922, S22991, S37476, S31382, S34760, S31678, S24327 y S23295.

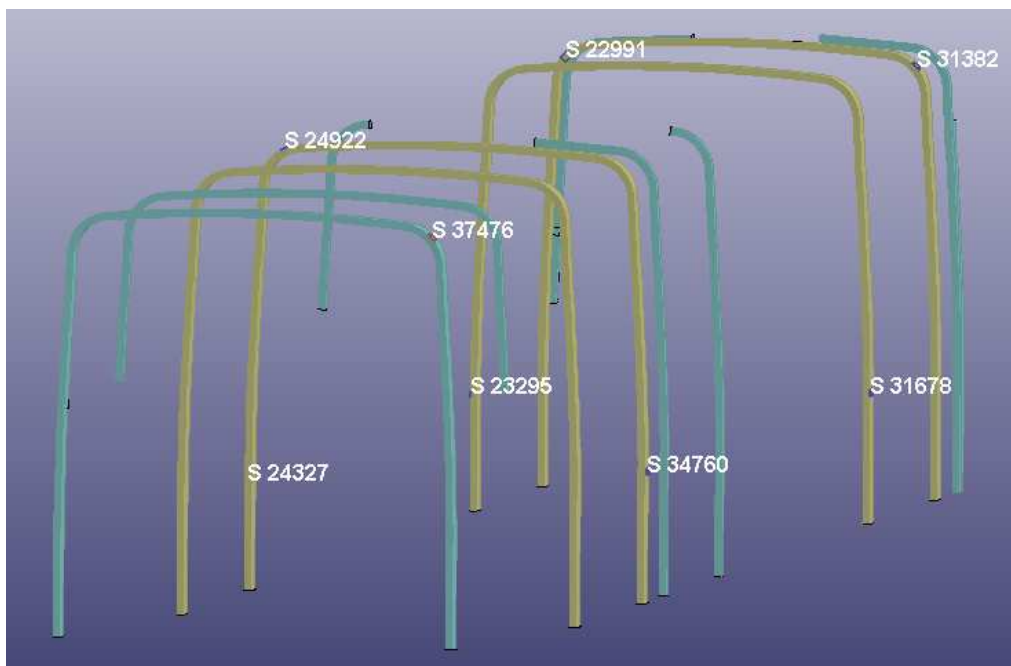


Figura 98: Elementos seleccionados para estudiar

### 5.5.1 Análisis de tensiones y deformaciones

En las Figuras 99, 100 y 101 se representa la tensión en los tres ejes. Hasta el momento del impacto, se registran pequeñas variaciones de tensión, pero en torno al valor nulo. Esto está relacionado con el hecho del pivotamiento de la estructura en el inicio del vuelco. Analizado esto, sólo queda decir que en los tres ejes se producen los picos de tensión en el momento del impacto, es decir, en el instante  $t = 2.6$  segundos. Observando la Figura 99 en particular, se comprueba que aparecen unas tensiones debidas al efecto comentado anteriormente de que la estructura tiene una cierta inclinación, hecho que permite que se produzca un pequeño pivotamiento en el suelo. De la figura 101, esfuerzos en el eje Z, se extrae que las barras que golpean contra el suelo están sometidas a compresión, elementos C y D, mientras que la tracción se concentra en los elementos A y B del lateral opuesto.

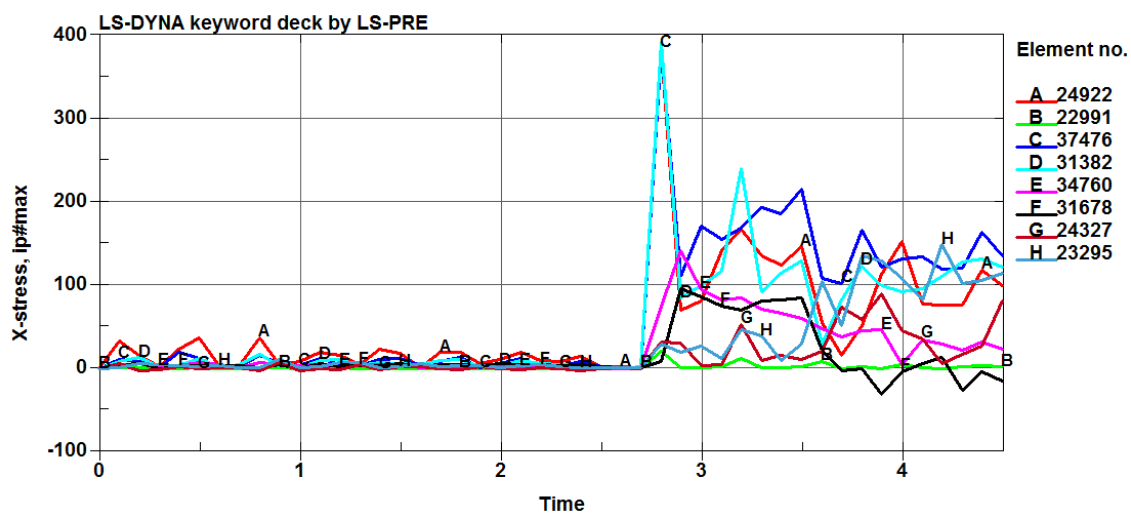


Figura 99: Tensión en el eje X en los elementos seleccionados

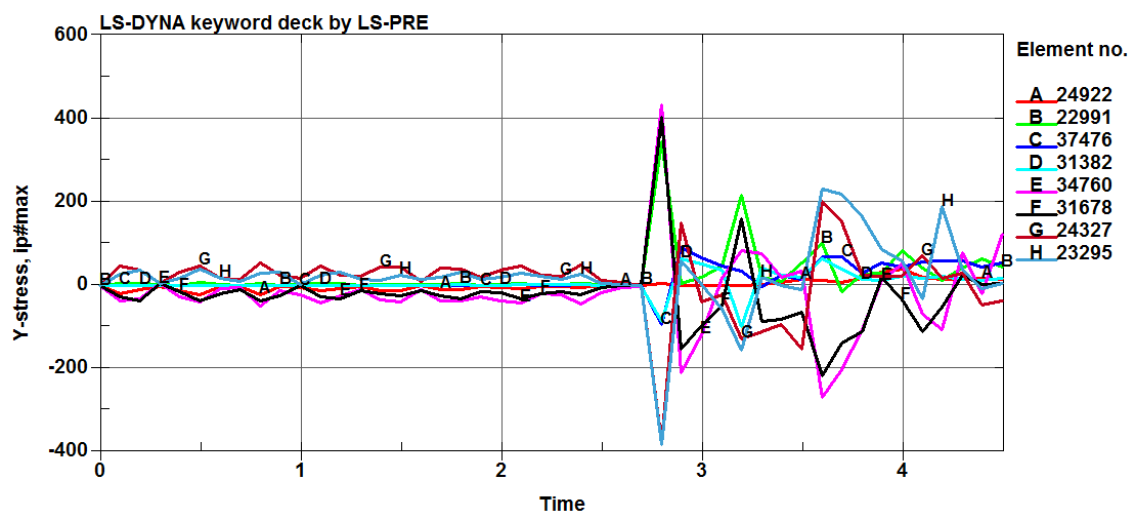


Figura 100: Tensión en el eje Y en los elementos seleccionados

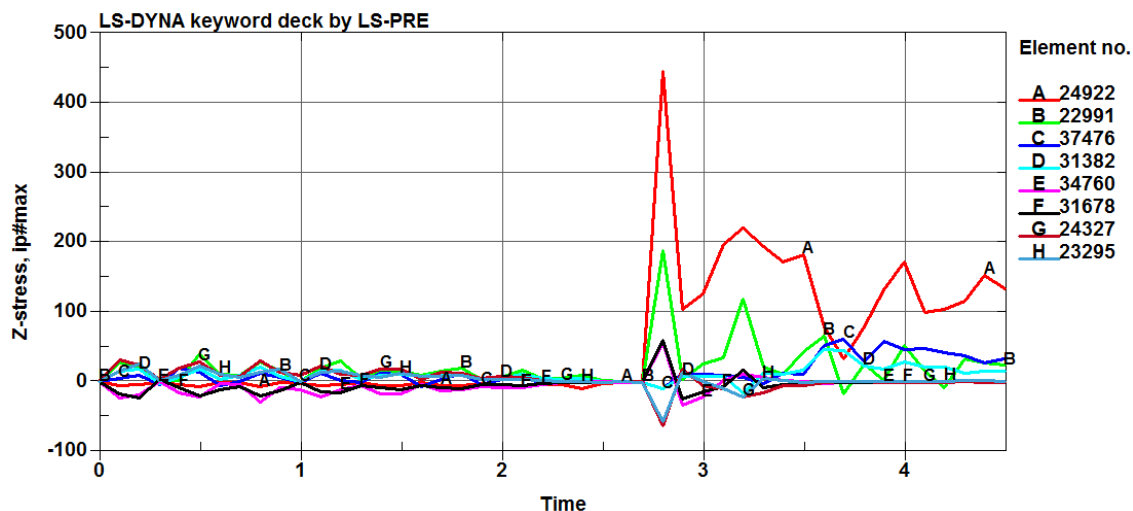


Figura 101: Tensión en el eje Z en los elementos seleccionados

En la Figura 102, se representa la deformación plástica equivalente, es decir, la deformación permanente que tras cesar la aplicación de tensión en el impacto, no es recuperada por superarse el régimen elástico del material. Centrando la atención en la mencionada gráfica, puede comprobarse que no existe deformación plástica hasta el instante posterior al impacto, ya que tras el mismo, parte de la deformación no es recuperada por el material.

Otra cosa interesante que se puede extraer, es la confirmación de que aunque tras el impacto, la estructura continúa moviéndose y registrando picos de desplazamiento, velocidad y tensión, no se producen deformaciones plásticas. Esto se comprueba viendo como el valor de deformación permanente se mantiene constante desde el impacto, a excepción de determinados puntos críticos, que como el elemento E, perteneciente a la unión entre el arco y la estructura del suelo, sufren una segunda deformación en el movimiento de la estructura.

Por otro lado, se puede concluir que la máxima deformación plástica se registra en los elementos de unión entre el suelo y los arcos principales, debido a que son puntos de concentración de tensión y que sufrirán unas grandes reacciones al tratar de no permitir la deformación. El máximo de deformación equivalente se corresponde con el elemento E y alcanza un valor de 0.0068.



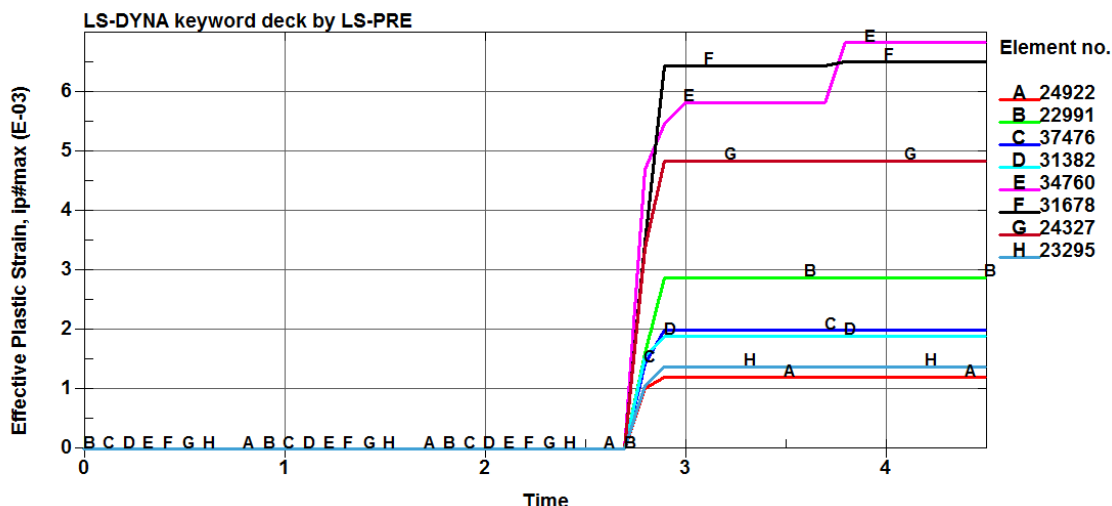


Figura 102: Deformación plástica equivalente de la estructura en los elementos seleccionados

En la Figura 103 se muestra la tensión equivalente de Von Mises y en la Figura 104 la tensión de Tresca, representada esta última como tensión máxima de cizalladura. Explicando de forma reducida en qué consisten los criterios de Von Mises y Tresca, se podría afirmar que el primero asegura que un material plastifica si su tensión equivalente de Von Mises, supera la tensión equivalente de Von Mises del ensayo de tracción en el límite elástico. De otra manera, el criterio de Tresca afirma que un material plastifica cuando su tensión tangencial máxima supera el valor de la tensión tangencial máxima del ensayo de tracción en el límite elástico. Expresando estos criterios en forma de fórmula, se obtienen las siguientes ecuaciones:

Criterio de Von Mises:  $\sigma_{VM} = \sigma_y$  ; Ec. 14

Criterio de Tresca:  $\tau_{max} = \frac{\sigma_y}{2}$  ; Ec. 15

Estos dos criterios únicamente coinciden en valor en el ensayo de tracción, pero en general habrá una mínima diferencia, siendo siempre el criterio de Tresca el más restrictivo.

Las tensiones máximas se registran en el instante del golpe, coincidiendo con el intervalo de tiempo en que se produce la mencionada deformación plástica. La tensión equivalente máxima de Von Mises alcanza un valor de 460 MPa, valor que se encuentra por encima del límite elástico de 440 MPa del material de los elementos seleccionados. Comparando este valor con el obtenido en la gráfica de Tresca, la cual refleja un valor de tensión tangencial máxima de 260 MPa y que debe compararse con

los 220 MPa del límite elástico del material de los elementos, se puede concluir que aplicando este criterio también se produce plastificación. Uniendo ambos criterios, se observa que Tresca es más restrictivo, puesto que si lo comparamos con el límite elástico en vez de con la tensión de cizalladura, tendríamos un valor de 520 MPa, valor mayor que la tensión equivalente de Von Mises que fue de 460 Mpa.

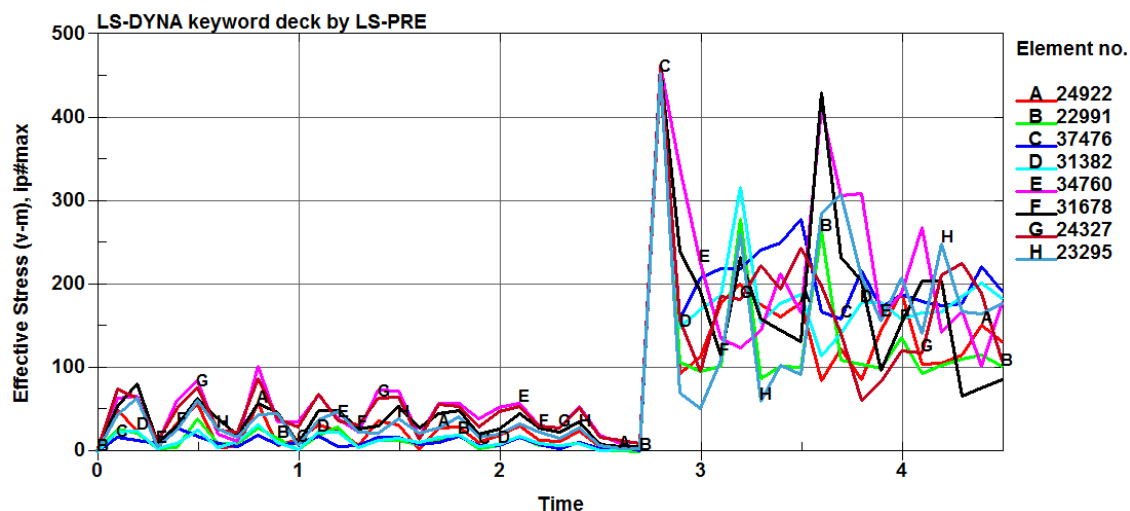


Figura 103: Tensión equivalente de Von Mises en los elementos seleccionados

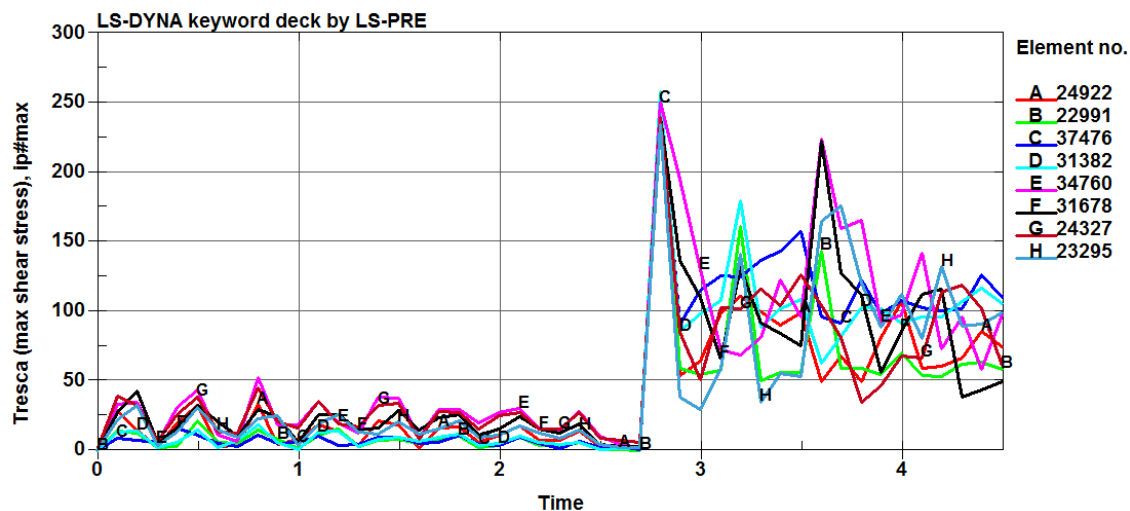


Figura 104: Tensión de Tresca en los elementos seleccionados

## 5.5.2 Análisis de esfuerzos

En las Figuras 105 y 106, se representan los esfuerzos axiales que soportan los elementos seleccionados durante la simulación, tanto en dirección del eje X como del eje Y. Estudiando ambas Figuras, se puede comprobar que los valores máximos, tanto de tracción como de compresión, se registran en el momento del impacto. El valor máximo de axil soportado entre los elementos seleccionados es de 1.35 KN.

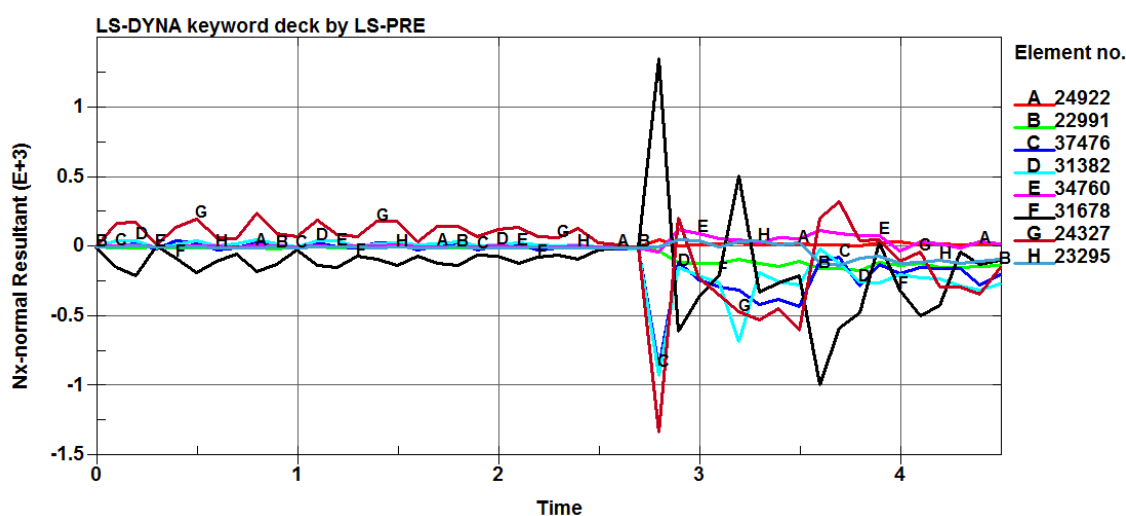


Figura 105: Esfuerzos axiales en dirección del eje X

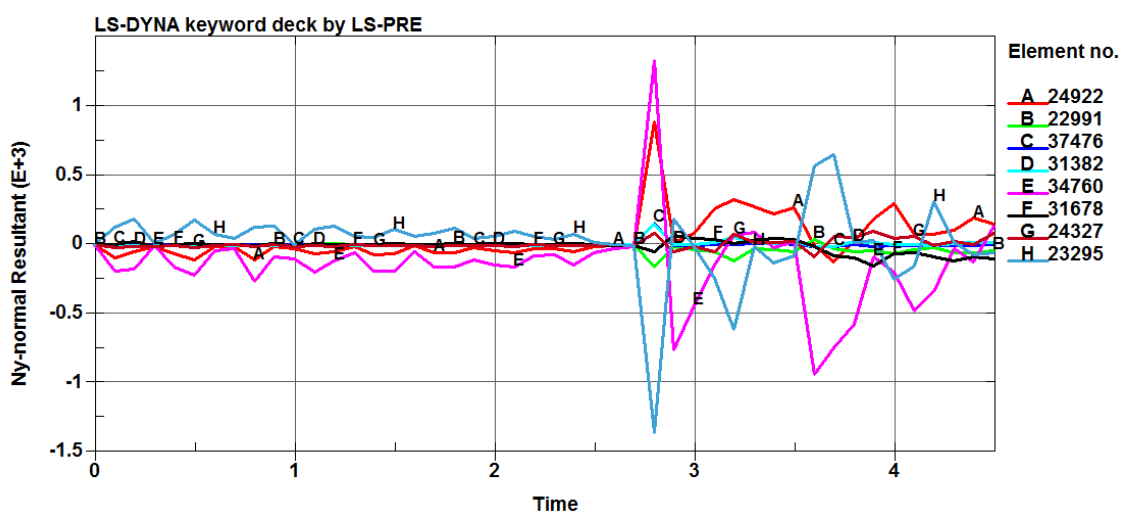


Figura 106: Esfuerzos axiales en dirección del eje Y

# Capítulo VI: Conclusiones y desarrollos futuros

## 6.1 Conclusiones

Al inicio del presente proyecto se establecieron una serie de objetivos a cumplir, como son, el estudio de la deformación de un autobús a través del ensayo recogido en el Reglamento R66 empleando el programa LS-Dyna y comprobar si su estructura superaría dicho ensayo para una posible homologación de la estructura.

Se ha podido comprobar la facilidad que brinda LS-Prepost para la introducción de parámetros, condiciones, restricciones o incluso creación de materiales con un gran abanico de posibilidades siempre dirigido a una posterior simulación en el entorno LS-Dyna. Además, LS-Prepost ahorra la necesidad de utilizar programación compleja en LS-Dyna, pudiendo ser utilizado por un mayor número de usuarios. También admite importar los modelos directamente desde cualquier programa de diseño que permita guardar archivos en formato .IGES, como pueden ser Solid Edge, Solid Works o Catia. De esta forma, únicamente se deben introducir en LS-Prepost los parámetros necesarios para la simulación. Por tanto, se puede concluir que se trata de un programa a tener en cuenta para futuros trabajos y muy versátil debido a su rápida adaptación a diferentes configuraciones como es el caso de este proyecto, importando varias piezas desde Solid Works, con el autobús diseñado directamente en LS-Prepost, sin registrar ningún tipo de conflictos entre ellos ni con el programa.

Por otra parte, hay que mencionar la importancia que están cobrando en los últimos años las herramientas informáticas de cálculo por elementos finitos, siendo actualmente imprescindibles en cualquier lugar de trabajo dedicado a la ingeniería, entre otras ventajas, por el impacto económico que reduce el hecho de realizar simulaciones previas en vez de tener que construir costosos modelos para ensayar. Estos programas permiten ajustar y simplificar al máximo los modelos empleados para superar, como en este caso, los test de vuelco y así ahorrar construyendo un modelo que ya se encuentra avanzado en su fase de desarrollo. Por estas razones, se debe resaltar lo importante que es en la actualidad para poder ser un profesional

competitivo, conocer y saber utilizar cuantos más programas y herramientas informáticas, así como ser capaz de entender los resultados y obtener conclusiones coherentes.

En cuanto a los resultados que se han comentado en el capítulo V, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El programa LS-Dyna es capaz de resolver problemas dinámicos complejos mediante el método de elementos finitos, en un tiempo contenido, obteniendo resultados fiables y fáciles de procesar, permitiendo extraer tanto gráficas como animaciones, con toda la información necesaria para un correcto análisis.
- La estructura empleada, cuyo punto inestable se alcanza cuando la misma se sitúa a  $48,31^\circ$  con respecto al plano horizontal, superaría de forma satisfactoria las pruebas exigidas en el Reglamento R66. Esto se puede concluir debido a que mediante inspección visual, ninguna parte de la estructura, se introduce dentro de la zona delimitada por el espacio de supervivencia.
- Se registra un gran margen entre la estructura deformada y el espacio de supervivencia, por tanto se podría incrementar notablemente la altura de caída y aún así se superaría favorablemente el test. Esto da una idea del alto nivel de seguridad con el que está diseñada la estructura.
- LS-Prepost puede considerarse una herramienta de gran ayuda para poder realizar complicadas simulaciones, mediante una interfaz intuitiva y que utiliza todo el potencial de Ansys para resolver estos problemas. Finalmente, LS-Prepost ayuda al usuario a la hora de obtener los resultados de forma sencilla y con gráficas de alto valor analítico.
- Analizando profundamente los resultados obtenidos, se observa que el valor de la tensión de Von Mises, no así el de Tresca, refleja que la estructura ha sufrido deformación plástica por un margen muy reducido. Por tanto, se podría incrementar la altura de caída para que se produjera una

deformación plástica mayor y comprobar así, si sigue sin registrarse intrusión en el espacio de supervivencia.

## 6.2 Desarrollos futuros

A continuación se exponen una serie de trabajos relacionados con este proyecto, que podrán ser desarrollados para continuar en la línea de trabajo mejorando ya sea el modelo o los resultados obtenidos:

- Estudio mediante ensayo a torsión de la estructura. Un parámetro muy importante de las estructuras es la rigidez a torsión, por ello, sabiendo que esta estructura superaría un ensayo de vuelco realizado conforme al Reglamento R66, sería interesante conocer sus características en cuanto a rigidez a torsión.
- Simulación de un ensayo de impacto con péndulo según el Reglamento R66. Para poder corroborar los satisfactorios resultados obtenidos, sería interesante realizar el ensayo de impacto con péndulo. Esto permitiría comprobar que los resultados obtenidos son similares y asegurar que la estructura es totalmente segura. Además, con los materiales y secciones rígidos ya creados, únicamente habría que elaborar el diseño del péndulo, invirtiendo un tiempo reducido en realizar el mencionado ensayo.
- Debido a que la calidad del mallado condensa el tiempo de simulación, se podría imponer un mallado más fino, el cual haría que la simulación fuera más lenta, pero los resultados obtenidos serían más representativos.
- Como se dispone del modelo del autobús completo con carrocería, cristales, motor, etc, se podría realizar el ensayo de vuelco o de impacto con péndulo con el modelo completo. Esto supondría un gran tiempo de simulación, pero teniendo en cuenta los conocimientos adquiridos durante la realización del presente proyecto, se podría realizar sin necesidad de esperar para hacer pruebas, sino directamente cambiar la estructura por el autobús y adecuar la plataforma de vuelco a los nuevos valores de posición del centro de gravedad. Además, el modelo completo dispone de suspensión, que aunque el Reglamento R66 solicita que el autobús de test

sea rígido, podría emplearse para estudiar y comparar el modelo con y sin suspensión.

- LS-Dyna es un programa muy utilizado para realizar ensayos con dummies y además, incorpora tanto materiales, como características para simular cinturones de seguridad. Existen ensayos realizados con dummies del modelo de autobús proporcionado, pero únicamente de impacto frontal para ver el comportamiento de la estructura en relación a los pasajeros. Un trabajo con alto valor analítico sería realizar el ensayo de vuelco con el autobús y los dummies en la posición de marcha.
- Dado que LS-Dyna permite simulación de ensayos dinámicos, se podría realizar el vuelco del autobús con o sin pasajeros al negociar una curva. Esto permitiría observar la deformación de la carrocería, teniendo en cuenta las fuerzas de inercia que actúan en un vuelco en movimiento. Esto no sería complicado de realizar empleando LS-Prepost, ya que es muy sencillo imponer velocidades iniciales y modificar los valores de adherencia entre el autobús y el asfalto.
- Otra posibilidad que afirmaría que los resultados obtenidos son correctos, sería realizar el mismo ensayo, empleando otro software de simulación, como puede ser Abaqus, programa muy utilizado en la actualidad para desarrollar casos similares a LS-Dyna.

## Capítulo VII: Referencias

- [1] *INE: Instituto Nacional de Estadística*. (s.f.). Recuperado el Febrero de 2016, de [www.ine.es](http://www.ine.es)
- [2] Maldonado, J. A. (25 de 10 de 2013). La seguridad y sostenibilidad del transporte de viajeros por carretera.
- [3] (2016). Obtenido de Daimler AG: [http://www.mercedes-benz.es/content/spain/mpc/mpc\\_spain\\_website/es/home\\_mpc/bus/home/buses\\_world/tradition/milestones.html](http://www.mercedes-benz.es/content/spain/mpc/mpc_spain_website/es/home_mpc/bus/home/buses_world/tradition/milestones.html)
- [4] *Policías-Cop*. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de [http://www.policias-cop.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=362:tipos-de-accidentes-de-traffic&catid=55:accidente&Itemid=142](http://www.policias-cop.es/index.php?option=com_content&view=article&id=362:tipos-de-accidentes-de-traffic&catid=55:accidente&Itemid=142)
- [5] BOE. (2011). REGLAMENTO (UE) No 678/2011. *Marco para la homologación de los vehículos de motor y de los remolques, sistemas, componentes y unidades técnicas independientes destinados a dichos vehículos*.
- [6] BOE. (30 de marzo de 2011). Reglamento nº 66 de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (CEPE).
- [7] Díaz, V., Olmeda, E., Gauchía, A., García-Pozuelo, D., López, B., López, M. J., y otros. (2012). *Automóviles y ferrocarriles*. Madrid: UNED.
- [8] *Grupo de investigación en ingeniería matemática de la Universidad de Santiago de Compostela*. (s.f.). Recuperado el 04 de 2016, de [http://www.usc.es/ingmat/?page\\_id=1842](http://www.usc.es/ingmat/?page_id=1842)
- [9] Fernández, C. (2008). Simulación mediante LSDYNA de un ensayo de vuelco de un autobús según el Reglamento R66. Madrid.
- [10] Gómez, S. (Septiembre de 2009). SIMULACIÓN DE UN ENSAYO DE IMPACTO CON PÉNDULO SOBRE UN AUTOBÚS MEDIANTE LS-DYNA. Madrid.
- [11] Arroba, C. H. (2013). Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobús interprovincial marca Miral Infiniti en chasis Hino Ak sometida a volcadura, mediante los programas Ansys Ls-Dyna y su incidencia en el espacio de supervivencia. Ambato, Ecuador.
- [12] *Autopasión18*. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de <http://www.autopasion18.com/HISTORIA-GMC.htm>
- [13] *Beevoz*. (s.f.). Recuperado el Febrero de 2016, de <http://www.beevoz.com/2015/02/20/la-historia-del-autobus-como-medio-de-transporte/>
- [14] Beltrán, F. (1999). Teoría general del método de los elementos finitos. Madrid.



- [15] *De Chile*. (3 de Julio de 2016). Recuperado el Abril de 2016, de <http://etimologias.dechile.net/?o.mnibus>
- [16] *El Transporte*. (s.f.). Recuperado el Febrero de 2016, de <http://www.eltransporte.es/historia-del-autobus.html>
- [17] Europea, C. (2011). Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible.
- [18] Hernández, D. (Junio de 2015). SIMULACIÓN DE UN ATROPELLO MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS. Madrid.
- [19] ABC. (s.f.). Recuperado el Abril de 2016, de <http://www.abc.es/sociedad/20130710/abci-seguridad-autobuses-201307091137.html>
- [20] Ibáñez de Aldecoa, R. (s.f.). Estudio y simulación con Simulink de vuelco de un vehículo pesado en adelantamiento. Madrid.
- [21] Laplace, Universidad de Sevilla. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de [http://laplace.us.es/wiki/index.php/Vuelco\\_de\\_un\\_cami%C3%B3n](http://laplace.us.es/wiki/index.php/Vuelco_de_un_cami%C3%B3n)
- [22] Livermore Software Technology Corporation. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de <http://www.lstc.com/products/lis-dyna>
- [23] *Man Camiones España*. (2016). Recuperado el Marzo de 2016, de [http://www.truck.man.eu/es/es/mundo-man/man-en-espana/prensa-y-medios/100-anos-de-camiones-y-autobuses-MAN\\_-preparados-para-el-futuro--193024.html](http://www.truck.man.eu/es/es/mundo-man/man-en-espana/prensa-y-medios/100-anos-de-camiones-y-autobuses-MAN_-preparados-para-el-futuro--193024.html)
- [24] Scania Group. (2016). Recuperado el Abril de 2016, de <http://www.scania.es/about-scania/history/>
- [25] *The Nick Baldwin Collection*. (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de <http://baldwin.britishmotormuseum.co.uk/learning-zone/activity-bay/ticket-to-the-past/a-short-history-of-buses/index.htm>